



TUGAS AKHIR- TL141584

**PEMODELAN PENGARUH KECEPATAN
PELURU DAN ARAH SERAT KOMPOSIT
TERHADAP KEKUATAN IMPAK BALISTIK
KOMPOSIT E-GLASS/ISOPHTHALIC
POLYESTER**

Fariz Rifqi Zul Fahmi
NRP 2712100031

Dosen Pembimbing
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.

**JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016**



FINAL PROJECT – TL141584

**SIMULATION OF INFLUENCE OF VELOCITY OF
PROJECTILE AND FIBER DIRECTION TO
BALLISTIC IMPACT STRENGTH OF E-GLASS/
ISOPHTHALIC
POLYESTER COMPOSITE**

FARIZ RIFQI ZUL FAHMI
NRP 2712100031

Supervisor

Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.

**MATERIALS AND METALLURGICAL
ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF
TECHNOLOGY
SURABAYA
2016**

**PEMODELAN PENGARUH KECEPATAN PELURU
DAN ARAH SERAT KOMPOSIT TERHADAP
KEKUATAN IMPAK BALISTIK KOMPOSIT E-
GLASS/ISOPHTHALIC POLYESTER**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Material Inovatif
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

Fariz Rifqi Zul Fahmi
NRP 2712 100 031

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Lukman N., S.T., M.Sc.Eng,..... (Pembimbing)
2. Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D..... (Pembimbing)



PEMODELAN PENGARUH KECEPATAN PELURU DAN ARAH SERAT KOMPOSIT TERHADAP KEKUATAN IMPAK BALISTIK KOMPOSIT E-GLASS/ISOPHTHALIC POLYESTER

Nama Mahasiswa : Fariz Rifqi Zul Fahmi
NRP : 2712 100 031
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Dosen Pembimbing : Dr. Lukman Noerochim, ST., M.Sc.
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Simulasi impak balistik dilakukan untuk mengetahui pengaruh arah serat dan kecepatan peluru terhadap kekuatan impak balistik E-glass/isophthalic polyester. Proses analisa menggunakan perangkat lunak Ansys Mechanical APDL LS-Dyna. Simulasi dilakukan dengan menembakkan proyektil FMJ Parabellum 9mm bermassa 6,98gr dengan kecepatan tertentu ke komposit berukuran 100x100x0,57mm dengan jumlah layer 8, 12 dan 16. Variasi dalam tugas akhir ini berupa arah serat [± 45] dan [0,90] dan kecepatan peluru 300, 500 dan 800m/s. Dari hasil simulasi didapat bahwa komposit E-glass/isophthalic polyester dengan arah serat [± 45] memiliki kekuatan balistik lebih tinggi berturut turut 22,32%, 16,46% & 14,55% dari pada komposit dengan arah serat [0,90] untuk tiap kecepatan 300, 500 & 800m/s. Kekuatan balistik tertinggi komposit E-glass/isophthalic polyester arah serat [± 45] adalah pada kecepatan 500m/s, yang lebih besar 12.92% dan 43.81% daripada kecepatan 300m/s dan 800m/s sedangkan untuk arah serat [0.90] kecepatan 500m/s lebih besar 19% & 42.5% daripada kecepatan 300m/s dan 800m/s. Proses validasi menggunakan model Wen dan menunjukkan nilai error berkisar antara -0,94% sampai 24,2%.

Kata Kunci : isophthalic polyester, E-glass, komposit laminat, metode elemen hingga, impak balistik

**SIMULATION OF INFLUENCE OF VELOCITY OF
PROJECTILE AND FIBER DIRECTION TO BALLISTIC
IMPACT STRENGTH OF E-GLASS/ ISOPHTHALIC
POLYESTER COMPOSITE**

Name : Fariz Rifqi Zul Fahmi
NRP : 2712 100 031
Department : Materials and Metallurgicals Engineering
Supervisor : Dr. Lukman N., S.T., M.Sc.Eng
Mas Irfan P. Hidayat, ST., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Ballistic impact simulation carried out to determine the effect of fiber direction and speed of a bullet against ballistic impact strength E-glass / Isophthalic polyester. Software analysis process using Ansys Mechanical APDL LS-Dyna. Simulations carried out by firing projectiles 9mm Parabellum FMJ 6,98gr mass at a certain speed to size composite 100x100x0,57mm the number of layers 8, 12 and 16. Variations in this final form are the fiber direction $[\pm 45]$ and $[0.90]$ and speed bullet 300, 500 and 800m / s. From the simulation results obtained composites E-glass / Isophthalic polyester fiber direction $[\pm 45]$ have a higher ballistic strength respectively 22.32%, 16.46% and 14.55% of the composite with the direction of fibers $[0.90]$ for each speed of 300, 500 and 800m / s. Strength ballistic highest composite E-glass / Isophthalic polyester fiber direction $[\pm 45]$ is at a speed of 500m / s, a bigger 12.92% and 43.81% than the speed of 300m / s and 800m / s while the fiber direction $[0.90]$ the speed of 500m / s is greater 19% and 42.5% than the speed of 300m / s and 800m / s. The validation process using models Wen and demonstrate the value of error ranging from -0.94% to 24.2%.

Keywords: *Isophthalic polyester, E-glass, composite laminate, the finite element method, ballistic impact*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas hidayah, rahmat dan ridho-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat dirampungkan. Tugas Akhir yang berjudul **“Pemodelan Pengaruh Kecepatan Peluru Dan Arah Serat Komposit Terhadap Kekuatan Impak Balistik Komposit E-Glass/Isophthalic Polyester”**, disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelas Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penyusunan Tugas Akhir ini dapat terlaksana dengan baik berkat bantuan, bimbingan, dan saran dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orangtua dan adik satu-satunya yang selama ini telah memberikan dukungan do'a, moral, tenaga, dan materi.
2. Bapak Lukman Noerochiem, S.T., M.Sc. (Eng)., Ph.D. dan Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing serta Bapak Ibu dosen penguji yang telah bersedia memberikan bimbingan dan pengarahan.
3. Bapak Agung Purniawan, S.T., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
4. Seluruh dosen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
5. Seluruh karyawan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Seluruh mahasiswa Jurusan Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2012 serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan Tugas Akhir ini masih terdapat banyak kekurangan. Oleh karena itu penulis selalu mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak untuk perbaikan di masa yang akan datang.

Surabaya, Januari 2016

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK	vii
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Makromekanik Komposit.....	5
2.2. Beban Gaya dan Momen Dalam Laminat.....	8
2.3. Lamina Isotropik Transversal	10
2.4. Mekanika Penetrasi Impak	12
2.4.1. Perubahan Kecepatan Sisa dan Penyerapan Energi	13
2.4.2. Perilaku Kegagalan Laminat	13
2.5. Energi Impak Balistik Komposit	14
2.6. Teori Kegagalan Komposit.....	16
2.7. Validasi	17
2.8. Penelitian Sebelumnya	18

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Diagram Alir	29
3.2. Spesifikasi Material.....	31
3.2.1. Material Komposit.....	31
3.2.2. Material Proyektil.....	31
3.3. Parameter Uji Impak Balistik	32

3.4. Peralatan.....	32
3.5. Proses Penelitian	32
3.5.1. Pemodelan Komposit E-Glass Isophthalic Polyester	32
3.5.2. Pemodelan Proyektil.....	33
3.6. Pemodelan Kondisi Pembebanan.....	34
3.7. Perhitungan Validasi	35

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Elemen Hingga.....	37
4.2 Hasil Pemodelan Pada Variasi Kecepatan Peluru	39
4.2.1 Kecepatan 300m/s	39
4.2.1.1 Komposit 8 Layer [± 45] dan [0,90]	39
4.2.1.2 Komposit 12 Layer [± 45] dan [0,90]	46
4.2.1.3 Komposit 16 Layer [± 45] dan [0,90]	52
4.2.1.4 Perbandingan Hasil Pemodelan Komposit 8, 12 dan 16 Layer 300m/s.....	58
4.2.2 Kecepatan 500m/s	61
4.2.2.1 Komposit 8 Layer [± 45] dan [0,90]	61
4.2.2.2 Komposit 12 Layer [± 45] dan [0,90]	68
4.2.2.3 Komposit 16 Layer [± 45] dan [0,90]	74
4.2.2.4 Perbandingan Hasil Pemodelan Komposit 8, 12 dan 16 Layer 500m/s.....	80
4.2.3 Kecepatan 800m/s	83
4.2.3.1 Komposit 8 Layer [± 45] dan [0,90]	83
4.2.3.2 Komposit 12 Layer [± 45] dan [0,90]	90
4.2.3.3 Komposit 16 Layer [± 45] dan [0,90]	96
4.2.3.4 Perbandingan Hasil Pemodelan Komposit 8, 12 dan 16 Layer 800m/s.....	102
4.2.3.5 Perbandingan Kekuatan Balistik Komposit 8, 12 dan 16 Layer kecepatan 300m/s, 500m/s dan 800m/s	105
4.3. Validasi	107

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	111
5.2 Saran	111

DAFTAR PUSTAKA	xxii
LAMPIRAN.....	xxvi
BIOGRAFI PENULIS	xxxi

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Unidireksional lamina sebagai material monoklinik (Kaw, 2006)	5
Gambar 2.2 Koordinat prinsipal dan lokal komposit (Jones, 1998)	7
Gambar 2.3 a) Gaya resultan b) Momen resultan pada laminat datar (Kaw 2006).....	9
Gambar 2.4 Tumpukan lamina pada laminat (Venucec, 2000) ..	9
Gambar 2.5 Sifat mekanik komposit laminat 4 layer dengan arah serat berbeda(Vnucec,2000).....	10
Gambar 2.6 <i>Physical symmetry</i> dari lamina berpenguat unidireksional (Jones, 1998).....	11
Gambar 2.7 Ilustrasi mekanika penetrasi pada komposit.....	12
Gambar 2.8 Formasi hourglass/jam pasir	12
Gambar 2.9 Pengaruh gesekan terhadap area deformasi yang terjadi	14
Gambar 2.10 Experimental pengujian ballistic limit	15
Gambar 2.11 Hasil Percobaan <i>ballistic limit</i>	15
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	29
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	39
Gambar 3.3 <i>Meshing</i> pada komposit	33
Gambar 3.4 Peluru kaliber 9mm standar NIJ.....	33
Gambar 3.5 Elemen tetrahedron proyektil.....	34
Gambar 3.6 Pembebanan <i>Displacemen</i>	34
Gambar 3.7 Pemodelan kontak.....	35
Gambar 4.1 Grafik kecepatan proyektil komposit [± 45] dan [0,90] 8layer 300m/s.....	40
Gambar 4.2 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,89E-5s	42
Gambar 4.3 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,14E-4s	43
Gambar 4.4 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,17E-4s	44

Gambar 4.5 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit [± 45] dan [0,90] 8 layer 300m/s	45
Gambar 4.6 Grafik kecepatan proyektil komposit [± 45] dan [0,90] 12layer 300m/s	46
Gambar 4.7 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,4E-5s	48
Gambar 4.8 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,7E-5s	49
Gambar 4.9 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 2,1E-5s	50
Gambar 4.10 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit [± 45] dan [0,90] 12 layer 300m/s	51
Gambar 4.11 Grafik kecepatan proyektil komposit [± 45] dan [0,90] 300m/s	52
Gambar 4.12 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,4E-5s	54
Gambar 4.13 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,8E-5s	55
Gambar 4.14 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 2,0E-5s	56
Gambar 4.15 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit [± 45] dan [0,90] 16 layer 300m/s	57
Gambar 4.16 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit [± 45] dan [0,90] 300m/s	58
Gambar 4.17 Perbandingan energi kinetik proyektil yang terserap komposit [± 45] dan [0,90] 300m/s	58
Gambar 4.18 Perbandingan waktu perforasi proyektil pada komposit [± 45] dan [0,90] 300m/s	59
Gambar 4.19 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit [± 45] dan [0,90] 8, 12 dan 16 layer 300m/s	60
Gambar 4.20 kekuatan balistik komposit [± 45] dan [0,90]	61
Gambar 4.21 Grafik kecepatan proyektil komposit [± 45] dan [0,90] 500m/s	62
Gambar 4.22 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,1E-5s	64
Gambar 4.23 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,2E-5s	65
Gambar 4.24 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,4E-5s	66
Gambar 4.25 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit [± 45] dan [0,90] 8 layer 500m/s	67

Gambar 4.26 Grafik kecepatan proyektil komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 500m/s	69
Gambar 4.27 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $2,1E-5s$	70
Gambar 4.28 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $2,2E-5s$	71
Gambar 4.29 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $2,6E-5s$	72
Gambar 4.30 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 500m/s	73
Gambar 4.31 Grafik kecepatan proyektil komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500m/s	74
Gambar 4.32 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,4E-5s$	76
Gambar 4.33 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,8E-5s$	77
Gambar 4.34 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $1,2E-5s$	78
Gambar 4.35 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 500m/s	79
Gambar 4.36 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500m/s	80
Gambar 4.37 Perbandingan energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500m/s	81
Gambar 4.38 Perbandingan waktu perforasi proyektil pada komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500m/s	81
Gambar 4.39 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 500m/s	82
Gambar 4.40 Kekuatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500m/s	83
Gambar 4.41 Grafik kecepatan proyektil komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s	84
Gambar 4.42 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,2E-5s$	86
Gambar 4.43 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,4E-5s$	87
Gambar 4.44 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,6E-5s$	88
Gambar 4.45 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer 800m/s	89

Gambar 4.46 Grafik kecepatan proyektil komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12layer 800m/s	90
Gambar 4.47 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,3E-5s$	92
Gambar 4.48 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,5E-5s$	93
Gambar 4.49 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,8E-5s$	94
Gambar 4.50 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 800m/s	95
Gambar 4.51 Grafik kecepatan proyektil komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16layer 800m/s	96
Gambar 4.52 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,4E-5s$	98
Gambar 4.53 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,6E-5s$	99
Gambar 4.54 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,7E-5s$...	100
Gambar 4.55 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 800m/s	101
Gambar 4.56 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s	102
Gambar 4.57 Perbandingan energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s	102
Gambar 4.58 Perbandingan waktu perforasi proyektil pada komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s	103
Gambar 4.59 Grafik kecepatan proye Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 800m/s	104
Gambar 4.60 Kekuatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s	105
Gambar 4.61 Kekuatan balistik komposit $[0,90]$ kecepatan 300m/s, 500m/s & 800m/s	106
Gambar 4.62 Kekuatan balistik komposit $[\pm 45]$ kecepatan 300m/s, 500m/s & 800m/s	106

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian sebelumnya	18
Tabel 3.1 Sifat mekanik komposit E-glass/Isophthalic-polyester berdasarkan ASM Handbook vol 21.....	31
Tabel 3.2 Sifat Mekanik Proyektil.....	31
Tabel 4.1 Konstanta komposit Sesuai Variasi Arah Serat	37
Tabel 4.2 Kekuatan Komposit Sesuai Variasi Arah Serat	37
Tabel 4.3 Regangan volume arah serat 0,90 dan 45,-45	38
Tabel 4.4 Regangan efektif layer arah serat 0,90 dan 45,-45	38
Tabel 4.5 Batas kecepatan balistik komposit [± 45] dan [0,90] 8 layer 300m/s.....	40
Tabel 4.6 Waktu perforasi total komposit [± 45] dan [0,90] 8 layer 300m/s.....	40
Tabel 4.7 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit [± 45] dan [90,0] 8 layer 300m/s	45
Tabel 4.8 Batas kecepatan balistik komposit [± 45] dan [0,90] 12 layer 300m/s.....	47
Tabel 4.9 Waktu perforasi total komposit [± 45] dan [0,90] 12 layer kecepatan 300m/s	47
Tabel 4.10 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit [± 45] dan [90,0] 12 layer.....	51
Tabel 4.11 Batas kecepatan balistik komposit [± 45] dan [0,90] 16 layer	53
Tabel 4.12 Waktu perforasi total komposit [± 45] dan [0,90] 16 layer 300m/s.....	53
Tabel 4.13 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit [± 45] dan [90,0] 16 layer 300m/s	57
Tabel 4.14 Kekuatan balistik komposit [± 45] dan [0,90] 8, 12 dan 16 layer 300m/s.....	60

Tabel 4.15 Batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer 500m/s.....	62
Tabel 4.16 Waktu perforasi total komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer 500m/s.....	62
Tabel 4.17 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit $[\pm 45]$ dan $[90,0]$ 8 layer 500m/s	67
Tabel 4.18 Batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 500m/s.....	69
Tabel 4.19 Waktu perforasi total komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 500m/s.....	69
Tabel 4.20 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit $[\pm 45]$ dan $[90,0]$ 12 layer 500m/s	73
Tabel 4.21 Batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 500m/s.....	75
Tabel 4.22 Waktu perforasi total komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 500m/s.....	75
Tabel 4.23 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit $[\pm 45]$ dan $[90,0]$ 16 layer 500m/s	79
Tabel 4.24 Kekuatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 500m/s.....	82
Tabel 4.25 Batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer 800m/s.....	84
Tabel 4.26 Waktu perforasi total komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer kecepatan 800m/s	85
Tabel 4.27 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit $[\pm 45]$ dan $[90,0]$ 8 layer.....	89
Tabel 4.28 Batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 800m/s.....	91
Tabel 4.29 Waktu perforasi total komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer kecepatan 800m/s	91

Tabel 4.30 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit [±45] dan [90,0] 12 layer.....	95
Tabel 4.31 Batas kecepatan balistik komposit [±45] dan [0,90] 16 layer 800m/s.....	97
Tabel 4.32 Waktu perforasi total komposit [±45] dan [0,90] 16 layer kecepatan 800m/s	97
Tabel 4.33 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit [±45] dan [90,0] 16 layer 800m/s	101
Tabel 4.34 Kekuatan balistik komposit [±45] dan [0,90] 8, 12 dan 16 layer 800m/s	104
Tabel 4.35 Data pendukung validasi	107
Tabel 4.36 Batas kecepatan balistik model Wen	107
Tabel 4.37 Error relatif 300m/s.....	108
Tabel 4.38 Error relatif 500m/s.....	108
Tabel 4.39 Error relatif 800m/s.....	108

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada saat ini penggunaan rompi anti peluru berbahan dasar baja telah sangat luas dipakai, baik untuk keperluan militer maupun keperluan sipil. Namun rompi anti peluru berbahan dasar baja memiliki kelemahan utama, yaitu massanya yang cukup berat dan tidak nyaman digunakan. Oleh karena itu sampai saat ini banyak dilakukan penelitian untuk membuat material baru yang dapat mengatasi kelemahan baja tersebut. Material baru tersebut adalah komposit. Untuk saat ini, material komposit yang paling banyak dikembangkan sebagai rompi anti peluru adalah yang masing-masing material tersebut memiliki sifat mekanik tertinggi dibandingkan dengan material sejenis sehingga harganya juga tidak murah. Selain itu proses manufaktur dan pengujian mekaniknya juga tidak mudah dan membutuhkan biaya tinggi.

Salah satu pengujian mekanik terpenting yang sering digunakan dalam pengujian komposit adalah uji balistik. Pengujian ini berguna untuk mengukur kekuatan dampak balistik suatu komposit. Secara eksperimental, metode yang digunakan untuk menganalisa fenomena Dampak balistik pada rompi anti peluru telah banyak mengalami perubahan sebagai akibat dari ketertarikan para ilmuwan untuk menganalisa fenomena ini (Chelluru, 2004) namun, peralatan yang dibutuhkan untuk uji balistik terbatas hanya dimiliki oleh instansi tertentu. Sehingga dibutuhkan perijinan khusus pada instansi tersebut. Selain itu juga dibutuhkan biaya yang cukup mahal untuk sekali pengujian balistik. Di dalam eksperimen juga melibatkan banyak parameter yang cukup kompleks, maka dalam melaksanakan pengujian eksperimental diperlukan peralatan yang modern serta pengujian yang berulang-ulang untuk mengetahui dan memastikan karakteristik yang sebenarnya. Hal ini tentunya memakan biaya yang tidak sedikit dan juga diperlukan waktu yang panjang. Belum lagi, masalah ketidakhomogenan dari parameter-parameter dari

satu pengujian ke pengujian yang lain, seperti kecepatan proyektil yang selalu berubah-ubah. Hal ini tentunya akan menambah kompleksitas permasalahan impak balistik.

Maka dari itu dengan semakin berkembangnya berbagai perangkat lunak berbasis metode elemen hingga, para ahli mulai beralih dari analisis eksperimental ke analisis elemen hingga. Pada tahun 2014 peneliti Indonesia, Rizal Panglevi telah melakukan simulasi pengaruh arah serat terhadap kekuatan impak balistik komposit E-glass/isophthalic polyester dengan menggunakan software permodelan Patran dan Nastran. Dari hasil penelitian yang dilakukan dihasilkan kesimpulan bahwa komposit E-glass/isophthalic polyester dengan arah serat [45/-45/s] memiliki kekuatan balistik lebih tinggi 28,48 % dari pada komposit dengan arah serat [90/0/s]. Berangkat dari penelitian ini akan dilakukan simulasi kembali dengan material dan arah orientasi serat yang sama namun menggunakan proyektil berbeda yang memiliki bentuk *ogive* (FMJ Parabellum 9x19mm) dan dengan variasi kecepatan peluru (300ms^{-1} , 500ms^{-1} & 800ms^{-1}). Penelitian tugas akhir ini akan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak Ansys Mechanical APDL LS-Dyna® yang akan divalidasi secara eksperimental dengan menggunakan formulasi yang telah dirumuskan oleh Wen (Wen, 2002) untuk peluru berbentuk *hemispherical*.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kecepatan peluru terhadap kekuatan impak balistik komposit E-glass/isophthalic polyester ?
2. Bagaimana pengaruh arah serat komposit terhadap kekuatan impak balistik komposit E-glass/isophthalic polyester ?

1.3. Batasan Masalah

Untuk memperoleh hasil akhir yang baik dan tidak menyimpang dari permasalahan maka batasan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Komposit E-glass/isophthalic polyester dan proyektil peluru diasumsikan tanpa cacat.
2. Proyektil peluru tidak mengalami deformasi dan tidak terjadi pengurangan massa.
3. Hambatan udara dan panas yang dihasilkan akibat tumbukan antara proyektil dan komposit diabaikan.

1.4. Tujuan Penelitian

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisa pengaruh kecepatan peluru terhadap kekuatan impak balistik komposit E-glass/isophthalic polyester
2. Menganalisa pengaruh arah orientasi serat terhadap kekuatan impak balistik komposit E-glass/isophthalic polyester

1.5. Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat diketahui pengaruh kecepatan peluru terhadap kekuatan impak balistik komposit E-glass/isophthalic polyester. Sehingga dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan material rompi anti peluru yang bersifat unggul dan ekonomis.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

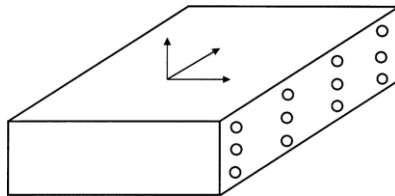
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Makromekanik Komposit

Material komposit merupakan material yang heterogen yang didalamnya terdapat serat-serat yang kontinyu yang menyebabkan perbedaan sifat mekanik di setiap titik pada material komposit lamina. Namun bagaimanapun juga, hubungan tegangan dan regangan komposit lamina bias diadaptasi dari material homogen. Hubungan tegangan dan regangan pada lamina regangan bidang, *plane strain* (tebal), lamina dengan serat unidirectional dan kondisi regangan bidang lamina dengan serat unidireksional dan kondisi regangan bidang, *plane stress* (tipis) tanpa mempertimbangkan material yang membentuk lamina tersebut. Analisa yang dilakukan dengan cara ini disebut analisa mekanika-makro (Sulistijono, 2012)

Metode analisa ini secara keseluruhan menggunakan hukum Hooks dalam perhitungannya. Hooks membagi tipe material menjadi lima berdasarkan interaksi sifat mekanik pada arah koordinat normal dengan arah gesernya, yaitu anisotropik, monoklinik, orthotropik, isotropik transversal dan isotropik. Pada penelitian ini yang akan dibahas adalah tipe orthotropik karena komposit merupakan material orthotropik yang ditandai dengan tidak saling mempengaruhinya sifat mekanik arah normal (σ_1 , σ_2 , σ_3) dan gesernya (τ_{12} , τ_{23} , τ_{31}).

Jika material memiliki tiga bidang tegak lurus yang simetri, maka matriks kekakuannya dapat dilihat pada persamaan 2.1 dan 2.2.



Gambar 2.1 Unidireksional lamina sebagai material monoklinik
(Kaw, 2006)

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Persamaan 2.1 dan 2.2 identik, hanya matriks kekakuannya diganti dengan notasi $[Q_{ij}]$, agar lebih spesifik menunjukkan material orthotropik. Dan hubungan regangan tegangannya:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Regangan normal, ε_3 , bukan merupakan regangan independen karena merupakan fungsi dari dua regangan normal lainnya, ε_1 dan ε_2 (Kaw, 2006). Komposit lamina unidireksional yang tipis dianggap tidak memiliki tegangan regangan pada arah 3, arah ketebalan, maka $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{31} = nol$ sehingga hubungan regangan-tegangan material orthotropik hanya pada bidang 1-2 (Sulistijono, 2012). Sehingga:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

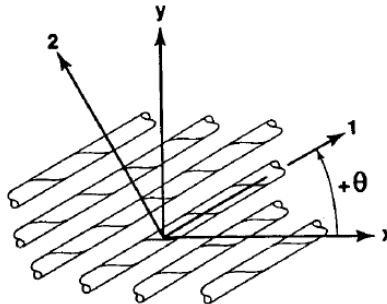
Harga matriks kekakuan $[Q_{ij}]$ dan harga matriks sesuaian $[S_{ij}]$ diperoleh dengan pengujian tarik lamina, dimana pada pengujian akan diperoleh harga perpanjangan spesimen yang bisa dikonversi

ke harga regangan. Sehingga nilai komponen matriks sesuaian $[S_{ij}]$ adalah $S_{11} = \frac{1}{E_1}$, $S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$, $S_{21} = \frac{1}{E_2}$ dan $S_{66} = \frac{1}{G_{12}}$. Invers dari persamaan 2.4 akan memberikan hubungan tegangan-regangan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Dimana $[Q_{ij}]$ adalah penurunan koefisien kekakuan yang relatif terhadap *compliance coefficient* sebagai : $Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}}$, $Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}}$, $Q_{22} = \frac{E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}}$ dan $Q_{66} = G_{12}$ (Kaw, 2006)

Pada penjelasan diatas, tegangan dan regangan digambarkan pada koordinat material principal/global untuk material orthotropik, namun arah prinsipal tidak selalu tepat dengan arah koordinat yang cocok untuk solusi dari sebuah masalah. Maka dari itu dibutuhkan hubungan antara tegangan regangan prinsipal dan lokal. Perhitungan ini dilakukan menggunakan koordinat prinsipal (x, y) dan lokal (1, 2) yang diperlihatkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Koordinat prinsipal dan lokal komposit (Jones, 1998)

Dari gambar 2.2 dapat diperoleh rumusan untuk mengekspresikan tegangan pada koordinat system xy atau koordinat system 1-2 dimana $c = \cos \theta$ dan $s = \sin \theta$.

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Transformasinya dapat ditulis sebagai:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy}/2 \end{bmatrix}$$

$$\text{Dimana: } [T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2sc \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -sc & sc & c^2 - s^2 \end{bmatrix}$$

Sehingga hubungan tegangan regangan pada koordinat x-y adalah:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Dimana,

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11}c^4 + Q_{22}s^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (2.9)$$

$$\bar{Q}_{12} = (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})s^2c^2 + Q_{12}(c^4 + s^4) \quad (2.10)$$

$$\bar{Q}_{16} = Q_{11}s^4 + Q_{22}c^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})s^2c^2 \quad (2.11)$$

$$\bar{Q}_{16} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})s^3c \quad (2.12)$$

$$\bar{Q}_{26} = (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})cs^3 - (Q_{22} - Q_{12} - 2Q_{66})c^3s \quad (2.13)$$

$$\bar{Q}_{66} = (Q_{11} + Q_{12} - 2Q_{12} - 2Q_{66})s^2c^2 + Q_{66}(c^4 + s^4) \quad (2.14)$$

2.2. Beban Gaya dan Momen dalam Laminat

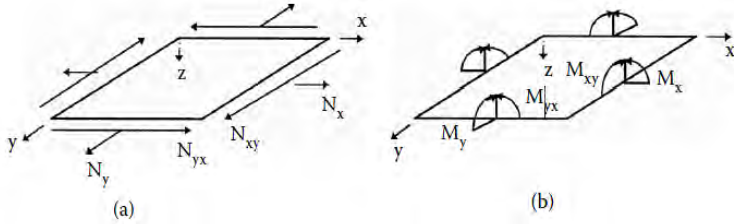
Tegangan pada laminat bervariasi dari laminat satu dengan yang lain. Gaya dan momen resultan yang diberikan pada laminat diperoleh dari integrasi tegangan disetiap lamina sepanjang ketebalan laminat. Untuk gaya resultan adalah:

$$N_i = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_i dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma_i^k dz \quad (2.15)$$

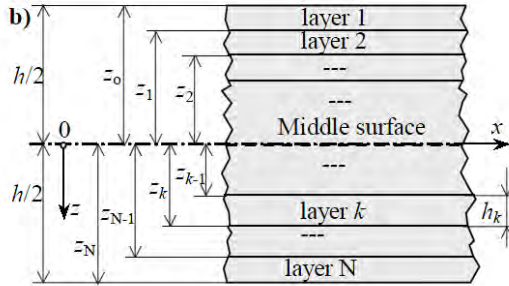
Dan untuk momen resultan adalah

$$M_i = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_i dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} z \sigma_i^k dz \quad (2.16)$$

Dimana N adalah Gaya per satuan lebar dan M adlah momen per satuan lebar laminat. Seperti pada gambar 2.3 dan 2.4:



Gambar 2.3 a) Gaya resultan b) Momen resultan pada laminat datar (Kaw 2006)



Gambar 2.4 Tumpukan lamina pada laminat (Venucec, 2000)

Dan persamaan gaya dan momen resultannya adlah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

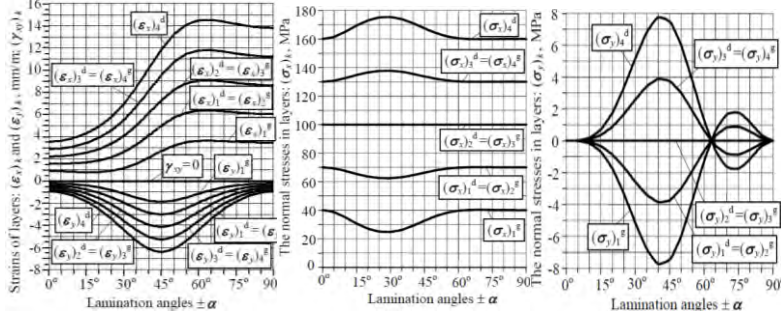
Dimana:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}) \quad (2.19)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (2.20)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (2.21)$$

Dengan perumusan ini, Vnucec (2000) dalam penelitiannya mengenai pembebanan terhadap komposit laminat E-glass/Epoxy V913 membuat grafik perubahan sifat mekanik akibat perubahan arah serat komposit pada masing-masing serat (4 serat) yang disajikan pada gambar 2.3.



Gambar 2.5 Sifat mekanik komposit laminat 4 layer dengan arah serat berbeda (Vnucec,2000)

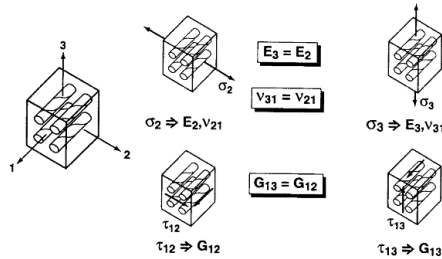
2.3. Lamina Isotropik Transversal

Diantara orthotropik material dan isotropik terdapat material disebut isotropik transversal. Ini adalah spesial sub dari orthotropik material. Kita mengasumsikan properties pada arah 2 dan 3 adalah sama. Isotropik transversal dikarakterisasi dengan bidang isotropik pada tiap titik pada material. Dengan mengasumsikan bidang 1-2 sebagai bidang isotropik pada tiap titik, maka dibutuhkan $E_1=E_2=E_p$, $\nu_{31}=\nu_{32}=\nu_{tp}$, $\nu_{13}=\nu_{23}=\nu_{pt}$, dan

$G_{13}=G_{23}=G_t$, $G_p=E_p/2(1+\nu_p)$ (Abaqus user's manual, 2007) dan tegangan regangannya menjadi

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_p & -\nu_p/E_p & -\nu_{tp}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_p/E_p & 1/E_p & -\nu_{tp}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{pt}/E_p & -\nu_{pt}/E_p & 1/E_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix},$$

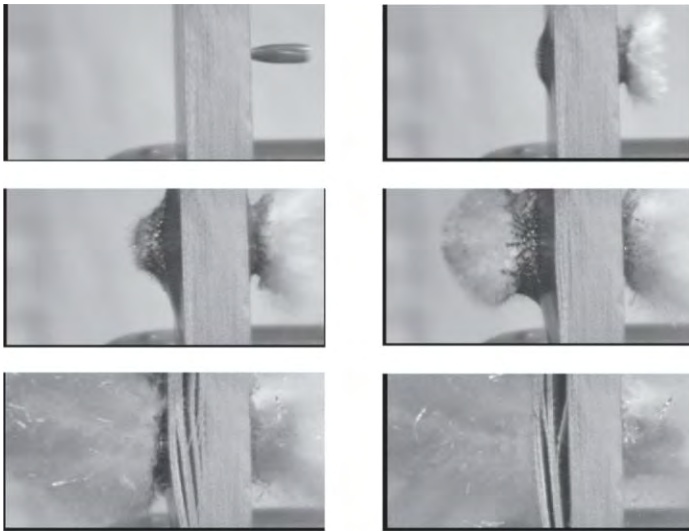
Observasi pada *physical symmetry* dari fiber dan matriks pada lamina berpenguat unidireksional memungkinkan kita untuk menyimpulkan bagaimana sifat dari *out-of plane* terkait dengan sifat dari *in-plane*. Asumsi yang digunakan adalah pertama, $E_3 = E_2$ karena kedua modulus elastisitas tersebut memiliki kondisi yang sama apabila dikenai pembebanan σ_3 atau σ_2 . Asumsi kedua, $\nu_{31} = \nu_{21}$ ($\nu_{13} = \nu_{12}$) dengan alasan yang sama dengan asumsi pertama. Asumsi ketiga, $G_{13} = G_{12}$ karena ketika pembebanan geser τ_{13} atau τ_{12} diterapkan, deformasi yang dihasilkan identik karena geometri lamina simetri maka modulus gesernya juga identik. Ketika kita memperhitungkan perbedaan E1 dari E2 pada bidang 1-2, maka kita dapat mengenali material tersebut sebagai lamina isotropik transversal, namun ketika kita hanya kosen pada bidang 1-2 maka disebut lamina isotropik. Dan jika lamina dikompaksi pada ketiga arah saat proses *curing* dan kemudian terdapat sedikit perbedaan sifat pada arah 2 dan 3, maka material tersebut menjadi orthotropik 3D.



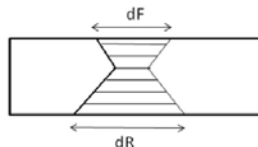
Gambar 2.6 *Physical symmetry* dari lamina berpenguat unidireksional (Jones, 1998)

2.4. Mekanika Penetrasi Impak

Perilaku komposit laminat *e-glass/polyester* saat proyektil menembus masuk telah banyak diteliti. Salah satunya adalah oleh P. Rama Subba Reddy (2015) dalam jurnalnya yang secara khusus meneliti tentang perilaku e-glass komposit saat dilakukan impak balistik. Dalam hal ini Rama melakukan penelitian secara eksperimental dengan menggunakan proyektil baja karbon menengah dengan ukuran 7.62x39mm yang ditembakkan dengan jarak 10 m dari komposit e-glass epoksi yang memiliki ketebalan berkisar 5-30mm dengan kecepatan peluru berkisar $500 \pm 15 \text{ ms}^{-1}$ sampai $700 \pm 15 \text{ ms}^{-1}$. Dari penelitian tersebut didapatkan hasil penetrasi proyektil pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Ilustrasi mekanika penetrasi pada komposit



Gambar 2.8 Formasi hourglass/jam pasir

2.4.1. Perubahan Kecepatan Sisa Dan Penyerapan Energi

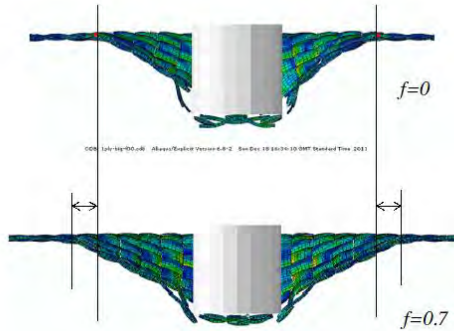
Proyektil peluru mulai melambat setelah menembus ketebalan tertentu. Saat terjadinya perlambatan proyektil, terjadi penyerapan energi oleh komposit. Selain menyerap energi komposit juga melakukan perlawanan terhadap energi dampak yang mengenainya, namun perlawanan ini tidak dapat diasumsikan linear searah bertambahnya ketebalan. Penyerapan energi pada tiap ketebalan dapat digunakan sebagai indikator performa material terhadap dampak balistik/kemampuan penyerapan energi oleh komposit. Waktu interaksi memainkan peranan penting dalam penyerapan energi. Semakin besar waktu interaksi maka memungkinkan volume yang lebih besar dari bahan untuk menyerap energi. Jadi saat peluru menumbuk dengan kecepatan yang semakin tinggi maka kemampuan komposit untuk menyerap energi menjadi semakin rendah

2.4.2. Perilaku Kegagalan Laminat

Gambar diatas memperlihatkan gambar dari video kecepatan tinggi saat terjadinya dampak balistik. Perpindahan peluru ke layer terakhir dapat dilihat dengan jelas setelah 200 μ s. Perpindahan ini terjadi karena adanya delaminasi dan daya regangan pada lapisan sisi belakang di ketebalan yang lebih tinggi. Perpindahan maksimum berkisar 25-30% dari ketebalan awal. Profil geometri setelah pembebanan awal ditunjukkan pada gambar 2.8. Kerusakan pada lamina membentuk pattern hourglass/seperti jam pasir. Bentuk kerucut awal menginterpretasikan perlawanan komposit terhadap penetrasi dampak

Pada penelitian lainnya yang dilakukan Yin Wang dan Xiaogang Chen (2015) menjelaskan pengaruh koefisien gesek pada penetrasi peluru. Saat koefisien gesek meningkat maka waktu yang dibutuhkan untuk menembus juga meningkat, sehingga kecepatan sisa dari peluru juga akan menurun. Hal ini membuat kapasitas penyerapan energi dari material menjadi bertambah besar. Koefisien gesekan juga berpengaruh terhadap area yang terdeformasi, ditunjukkan pada gambar 2.5, dengan koefisien

gesek yang tinggi akan semakin membuat daerah yang terdeformasi menjadi semakin luas.



Gambar 2.9 Pengaruh gesekan terhadap area deformasi yang terjadi

2.5. Energi Impak Balistik Komposit

Energi impak balistik dapat dihitung dengan menggunakan metode *V50 basic limit*. Banyak penelitian tentang impak balistik menggunakan metode ini untuk pengukuran, diantaranya penelitian yang dilakukan Roberts (2003), S. Leigh Phoenix (2003), Carillo (2012), Gaurav Nilakantan (2014). V50 ballistic adalah kecepatan impak yang mana menghasilkan kerusakan sebesar 50% pada target balistik. Yang dihitung dengan metode ini adalah energi impak balistik dan energi kinetik. Energi impak balistik (E) dihitung dengan cara mengukur selisih antara energi kinetik proyektil ketika menumbuk permukaan komposit $(E_K)_{int}$ sedangkan energi kinetik peluru dapat diketahui ketika selesai melakukan perforasi $(E_K)_{res}$.

$$E = (E_K)_{int} - (E_K)_{res} \quad (2.21)$$

Dengan $(E_K)_{int} = m_{proj}V_{int}^2$ dan $(E_K)_{res} = m_{proj}V_{res}^2$, sehingga persamaan diatas menjadi:

$$E = m_{proj}[V_{int}^2 - V_{res}^2] \quad (2.22)$$

Dimana selisih antara kecepatan proyektil ketika menumbuk komposit (V_{int}) dan kecepatan sisa proyektil setelah

melakukan perforasi (V_{res}) merupakan batas balistik (V_{50}) (lihat persamaan 2.23).

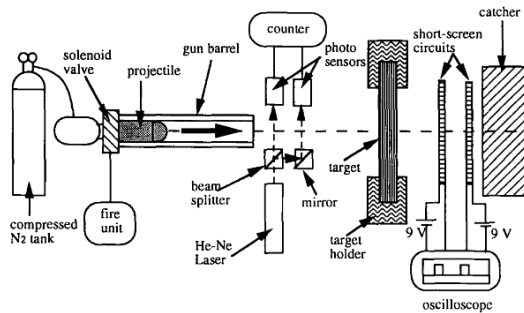
$$V_{50} = V_{int} - V_{res} \quad (2.23)$$

Sehingga persamaan 2.22 menjadi persamaan 2.24.

$$E = m_{proj} V_{50}^2 \quad (2.24)$$

Dengan mengetahui energi impak balistik dari komposit maka kekuatan impaknya juga dapat diketahui.

Cara diatas adalah untuk mengetahui batas balistik secara teoritikal, S.T. Jenq (1994) dalam journalnya yang berjudul "*Predicting The Ballistic Limit for Plain Woven Glass/Epoxy Composite Laminat*" melakukan perhitungan batas balistik secara teoritikal yang ditunjukkan oleh gambar 2.7



Gambar 2.10 Experimental pengujian ballistic limit

Dari percobaan ini didapatkan hasil seperti gambar 2.11 yang didalamnya terdapat prediksi dari batas balistik

Test no.	Incident velocity (V_i) (m/sec)	Exit velocity (V_e) (m/sec)	Estimated ballistic limit (m/sec)	Note
D01	141.5	—	—	pp* with rebound
D02	145.2	—	—	pp with rebound
D03	153.9	—	—	cp [†]
D04	164.5	43.7	158.6	cp
D05	169.8	60.6	159.6	cp
D06	190.1	103.1	159.7	cp

* Abbreviation 'pp' represents partial penetration.

† Abbreviation 'cp' represents complete penetration.

Gambar 2.11 Hasil Percobaan *ballistic limit*

Dan dalam hal ini, secara teoritikal, S.T Jenq menggunakan rumus berikut untuk menghitung energi balistik

$$\frac{1}{2} m_p V_{BL}^2 = \frac{1}{2} m_p V_s^2 - \frac{1}{2} m_p V_r^2 \quad \text{untuk } V_s > V_{BL}$$

Dimana m_p = Berat proyektil; V_{BL} = Batas balistik; V_s = kec awal; V_r = kec sisa

2.6. Teori Kegagalan Komposit

Kekuatan dari laminat bergantung pada kekuatan tiap lamina penyusunnya. Teori – teori untuk mengetahui kekuatan lamina, secara umum berdasarkan pada kekuatan normal dan geser pada lamina arah tunggal. Teori kegagalan sederhana pada material isotropik berdasarkan pada gaya prinsipal normal dan tegangan geser maksimum. Tetapi, pada lamina, teori kegagalan didasarkan pada tegangan pada material karena lamina bersifat orthotropik dan sifat – sifatnya berbeda pada sudut yang berbeda.

Untuk penelitian ini teori kegagalan yang digunakan adalah teori Chang-Chang. Teori ini menggunakan lima parameter berdasarkan pada penelitian Fu-Kuo Chang dan Kuo-Yen Chang (1987):

- S_1 , kekuatan tarik longitudinal
- S_2 , kekuatan tarik transversal
- S_{12} , kekuatan geser
- C_2 , kekuatan kompresif transversal
- α , parameter kenonlinieran kekuatan geser

C_2 diperoleh dari perhitungan tegangan sedangkan α diperoleh dari perhitungan tegangan-regangan geser. Pada analisa dua dimensi, regangan dihitung sebagai berikut:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E_1} (\sigma_1 - \nu_{12} \sigma_2) \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E_2} (\sigma_2 - \nu_{21} \sigma_1) \quad (2.26)$$

$$2\varepsilon_{12} = \frac{1}{G_{12}} \tau_{12} + \alpha \tau_{12}^3 \quad (2.27)$$

dan rasio tegangan geser terhadap kekuatan geser,

$$T = \left(\frac{\tau_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4} \alpha \tau_{12}^4 \right) / \left(\frac{S_{12}^2}{2G_{12}} + \frac{3}{4} \alpha S_{12}^4 \right) \quad (2.28)$$

Teori kegagalan Chang-Chang dibagi menjadi tiga kriteria kegagalan, yaitu:

- *Matrix Cracking Criteria*

$$F_{matrix} = \left(\frac{\sigma_2}{S_2}\right)^2 + T \quad (2.29)$$

Kegagalan diasumsikan terjadi ketika $F_{matrix} > 1$. Jika $F_{matrix} > 1$ maka konstanta material E_2 , G_{12} , ν_1 dan ν_2 diset sama dengan nol.

- *Compression Failure Criteria*

$$F_{comp} = \left(\frac{\sigma_2}{2S_{12}}\right)^2 + \left[\left(\frac{C_2}{2S_{12}}\right) - 1\right] \frac{\sigma_2}{C_2} + T \quad (2.30)$$

Kegagalan diasumsikan terjadi ketika $F_{comp} > 1$. Jika $F_{comp} > 1$ maka konstanta material E_2 , ν_1 dan ν_2 diset sama dengan nol.

- *Fiber Breakage Criteria*

$$F_{fiber} = \left(\frac{\sigma_1}{S_1}\right)^2 + T \quad (2.31)$$

Kegagalan diasumsikan terjadi ketika $F_{fiber} > 1$. Jika $F_{fiber} > 1$ maka konstanta material E_1 , E_2 , G_{12} , ν_1 dan ν_2 diset sama dengan nol.

2.7. Validasi

Untuk penelitian ini validasi yang digunakan adalah teori yang dikembangkan oleh Wen. Dalam penelitiannya Wen meneliti tentang penetrasi dan perforasi peluru terhadap laminat komposit.

Dalam penelitiannya Wen membahas tentang *resistive pressure* saat impak balistik dan memberikan asumsi yakni tekanan awal σ diaplikasikan ke permukaan proyektil dan penolakan penetrasi & perforasi oleh proyektil oleh laminat dibagi menjadi 2 bagian:

- *Cohesive quasi-static resistive pressure* σ_s
- *Dynamic resistive pressure* σ_d

Formula model balistik Wen disajikan pada persamaan 2.32.

$$V_b = \frac{3\pi\sqrt{\rho_t\sigma_e D^2 T}}{8G} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{32G}{9\pi\rho_t D^2 T}} \right] \quad (2.32)$$

dimana, V_b adalah batas kecepatan balistik, β adalah konstanta dimensional, ζ_e adalah tegangan ekuivalen, ρ_t adalah massa jenis komposit, D adalah diameter proyektil, T adalah ketebalan komposit dan G adalah massa proyektil.

$$W = F T \quad (2.33)$$

dengan $W = 0,5 G V_b^2$ dan $F = P A$ maka diperoleh formula kekuatan balistik komposit pada persamaan 2.35.

$$P = \frac{0.5 G V_b^2}{A T} \quad (2.34)$$

dimana P adalah kekuatan balistik, F adalah gaya dan A adalah luas permukaan komposit yang terkena proyektil (Panglevi, 2012).

2.8. Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian sudah dilakukan berkaitan dengan impact ballistic serta penetrasi dan perforasi dari proyektil peluru. Rangkuman akan beberapa penelitian tersebut dapat dilihat sebagai berikut:

Tabel 2.1 Penelitian Sebelumnya

1.	Judul	<i>Ballistic Simulation of Impact on Composite Laminate</i>
	Peneliti	M.A. Goncalves da Silva; Cosmin G. Chiorean; Corneliu Cismasiu
	Metode	Komposit berupa Kevlar 29/epoksi ukuran 400x400x2mm menggunakan proyektil standar STANAG 2920 & US MIL-P-46593. Proyektil ditembakkan berkali-kali

		dengan kecepatan yang berbeda untuk mengetahui batas kecepatan balistik (V_{50}). Juga memodelkan dengan software Autodyne dengan ukuran komposit 100x100x2mm dan menggunakan formulasi Lagrange untuk memperlihatkan kedua proyektil dan komposit dengan ukuran meshing 0,4mm
	Hasil	Impak balistik dimodelkan untuk memprediksi V_{50} & kerusakan global. Metode numerikal memperkirakan V_{50} dengan sangat akurat dibandingkan eksperimental. Untuk numerikal $V_{50}=380\text{ms}^{-1}$ dan eksperimental $V_{50}=375,8\text{ms}^{-1}$
	Judul	<i>Effect of Amino Functionalized MWCNTs on Ballistic Impact Performance of E-glass/epoxy Composite Using a Spherical Projectile</i>
2.	Peneliti	Muhammad Rahman; Mahesh Husein; Shaik Zainudin
	Metode	Resin SC-15 epoxy dengan serat e-glass dengan densitas $2,58\text{ gcm}^{-3}$ dan berdiameter 14-16 μm . Komposit ukuran 120x120x5,25mm ditembak dengan <i>spherical projectile</i> diameter 7.9mm & berat 2,10g. Peluru ditembakkan dengan kecepatan $240\text{-}380\text{ms}^{-1}$ dengan menggunakan <i>gun-gas</i> dengan mengkompresi gas helium dengan tekanan 0,34-1,38MPa. Pengujian selanjutnya

		menggunakan <i>ultrasonic c-scan</i> untuk informasi kuantitatif tentang kerusakan.
	Hasil	NH ₂ -MWCNTs dicampurkan ke dalam epoksi <i>e-glass</i> . Untuk penambahan MWCNTs sebesar 0,3wt% meningkatkan batas balistik sebesar 6%, kemampuan menyerap energy meningkat 0,3wt% serta meningkatkan toleransi kerusakan. Dapat disimpulkan bahwa kinerja dapat ditingkatkan walaupun dengan penambahan % yang sangat kecil dari MWCNTs
3.	Judul	<i>A Combine Experimental & Numerical Approach to Study Ballistic Impact Responce of S2-glass Fiber Toughened Epoxy Composite Beams</i>
	Peneliti	Ercan Serkat; Benjamin Liaw; Feridun Delale; Basavaraju B. Raju
	Metode	<ul style="list-style-type: none"> • Spesimen komposit menggunakan resin epoksi berpenguat serat kaca S2 diuji balistik menggunakan <i>gas gun</i> tekanan tinggi dari gas helium yang dikompresi. Peluru yang digunakan adalah caliber 22 dari tembaga dan dilakukan pada komposit dengan arah serat yang berbeda-beda. • Untuk analisa dengan metode elemen hingga menggunakan LS-Dyna dengan material properties mengikuti standar ASTM D-3518 dan model yang tersedia adalah Chang-chang model (teridentifikasi sebagai MAT-22) yang

		<p>mana valid untuk material <i>linear orthotropic</i>. Namun dalam eksperimental terlihat adanya perilaku nonlinear sehingga materialnya menggunakan MAT-User-Define (MAT-43) dan juga menggunakan teori erosi. Menggunakan kontak <i>surface to surface tiebreak</i> dan nilai damping dicari secara eksperimental (366,2Hz)</p>
	Hasil	<ul style="list-style-type: none"> • Pola kerusakan ditentukan dari eksperimental dan simulasi numerikal akan dibandingkan dan analisa dengan metode elemen hingga dengan <i>nonlinear orthotropic</i> lebih buruk dibanding <i>linear orthotropic</i>. • Selip antara layer komposit menunjukkan internal damping pada sistem. Rasio damping dapat diestimasi menggunakan regangan dinamik. • Selama uji impact, delaminasi, kegagalan matriks, kerusakan fiber dan deformasi peluru diobservasi. Banyaknya kegagalan diprediksi dengan baik menggunakan nonlinear orthotropic. • Batas kecepatan Balistik (V_{50}) dapat diperkirakan dengan cukup akurat dengan menggunakan hasil yang diperoleh dari uji balistik dan prediksi elemen hingga.
4.	Judul	<i>Residual Strengths of Composite Structures Subjected to Ballistic Impact</i>

	Peneliti	J. Wang; R. Calinan
	Metode	Proyektil dengan kaliber 7.62mm, 12,7mm & 20mm ditembakkan dengan kecepatan 200-1000ms ⁻¹ . Kecepatan sisa dihitung menggunakan dua <i>chronograph</i> yang dipasang di depan dan belakang target. Dilakukan juga uji tarik setelah diimpak. Dilakukan juga analisa elemen hingga dengan menggunakan software Nastran untuk mengetahui efek perbedaan lokasi kerusakan terhadap kekuatan spesimen
	Hasil	Kekuatan spesimen dengan kerusakan balistik secara signifikan lebih rendah dari spesimen awal. Namun hanya lebih rendah sedikit dibanding dengan spesimen yang dilubangi dengan mesin yang berdiameter sama dengan kaliber peluru. Tidak terlihat dengan jelas pengaruh kecepatan terhadap kekuatan sisa. Analisa elemen hingga menunjukkan bahwa tegangan geser di daerah yang jauh dari tengah secara signifikan lebih rendah dibanding daerah tengah spesimen.
5.	Judul	<i>Studies on Ballistic Impact of The Composite Panels</i>
	Peneliti	Sudhir Sastrya Y.B; Pattabhi R. Budarapu
	Metode	Lamina dengan ukuran 100x100x0,2mm disusun 8 layer dengan orientasi arah serat yang berbeda-beda. Komposit ini menggunakan matriks epoksi. Bola baja dengan diameter 5mm digunakan sebagai proyektil dan diletakkan tepat akan

6.		menyentuh laminat dan ditembakkan dengan kecepatan 100ms^{-1} . Kemudian dilakukan analisa dinamik pada CFRP, <i>e-glass</i> dan kevlar untuk 6 formasi arah serat: i) [45/-45/45/-45/-sym]; ii) [45/-45/45/45/rep]; iii) [0/90/0/90/rep]; iv) [0/90/0/90/-sym]; v) [0/90/45/-45/rep]; vi) [0/90/45/-45/-sym].
	Hasil	Dari ketiga bahan tersebut Kevlar menyerap energi maksimum paling tinggi yakni 43,8kj dibanding CFRP (39,8kj) dan e-glass/epoksi (15,6kj). CFRP menunjukkan karakteristik dampak yang lebih baik saat ditumbuk pada arah orientasi [45/-45/45/-45/rep], e-glass pada [0/90/45/-45/rep] dan Kevlar pada [45/-45/45/-45/-sym]
	Judul	<i>Impact Test on Waven Roving E-glass/polyester Laminates</i>
6.	Peneliti	Leigh Stuart; Carlos Guedes Soares
	Metode	Menggunakan mesin <i>falling-weight-impact-test</i> untuk penelitian ini. Spesimen diklem menggunakan dengan ukuran 120x75mm. Laminat terdiri dari 5-10 susun. Material yang digunakan adalah 500 gm^{-2} <i>woven roofing</i> , <i>e-glass</i> & resin <i>isophthalic polyester</i> dicuring menggunakan 1%, 2% & 3% akselerator, katalis & paraffin dengan fraksi fiber 50%. Untuk uji dampak menggunakan <i>massa</i> 5,853kg dan energy perforasi 80J.

	Hasil	Saat diberikan energy impak kecepatan rendah, jumlah kerusakan terlihat seperti delaminasi pada tengah bidang. Terlihat juga retak pada matriks dan kerusakan pada bagian belakang komposit.
7.	Judul	<i>Design & Ballistic of The Ceramic Composite Armor</i>
	Peneliti	Weilan Liu; Zhaofen Cheng
	Metode	Alumina (Al_2O_3) dipilih sebagai penyerap energy yang memiliki kekerasan tinggi. Alumina didesain berbenruk silinder dengan diameter 18mm dan panjang 18mm. digunakan juga plat $\text{Ti}_6\text{AL}_4\text{V}$ dengan tebal 3mm untuk layer pertama dan UHMWPE dengan tebal 5mm untuk meningkat ketangguhan komposit. Pada layer ketiga menggunakan campuran . $\text{Ti}_6\text{AL}_4\text{V}$, serat karbon & paduan aluminium 7075-T6 dan membentuk backplate komposit. Diuji balistik menggunakan standar MIL-STG 662F dengan jarak 10mm dari komposit ukuran $100 \times 100 \times 12,7\text{mm}$ & dengan kecepatan awal 818ms^{-1} . Dilakukan secara numerikal dengan menggunakan software ABAQUS
	Hasil	Saat uji impak, keramik silinder (alumina) menyerap energy dari proyektil sekitar 60% dan mentransfernya ke sekeliling. Pada saat proses penetrasi, layer ketiga memberikan peran pendukung terkuat untuk lapisan pertama sekaligus meningkatkan keseimbangan energy. Fungsi dari lapisan

		UHMWPE menyebabkan lapisan pertama dari Ti ₆ Al ₄ V menghasilkan tegangan tarik yang besar. Fenomena ini menunjukkan bahwa desain komposit backplate meningkatkan sifat antipeluru.
8.	Judul	<i>Ballistic Performance of Thermoplastic Composite Laminatess Made from Aramid Woven Fabric & Polypropylene Matrix</i>
	Peneliti	J.G. Carillo; R.A. Gamboa
	Metode	Penelitian ini membagi spesimen menjadi 2 yakni <i>multilayer aramid fabric composite laminate</i> (CL) dengan matriks PP dan <i>multilayer aramid fiber</i> (AF) tanpa matriks. Untuk dua konfigurasi ini menggunakan <i>plain woven hexcel aramid style 720 fabric (Kevlar 129 fiber, 1420 denier)</i> dengan ketebalan 0,032mm & densitas 910 kgm ⁻³ . Kekuatan tarik diukur berdasarkan ASTM D7269 D638. Ketiga spesimen akan dites untuk tiap material. CL & AF difabrikasi dengan ukuran 100x100mm dan diuji balistik dengan standar NATO STANAG 2920 menggunakan <i>spherical</i> steel proyektil diameter 6,7mm dengan kecepatan 274,5ms ⁻¹ . Selanjutnya dilakukan pemeriksaan menggunakan mikroskop optic untuk mengidentifikasi mekanisme kerusakan penyerapan energy selama impak.
	Hasil	Penambahan thermoplastic PP sebagai matriks meningkatkan performa balistik dari CL dibanding AF. Peningkatan

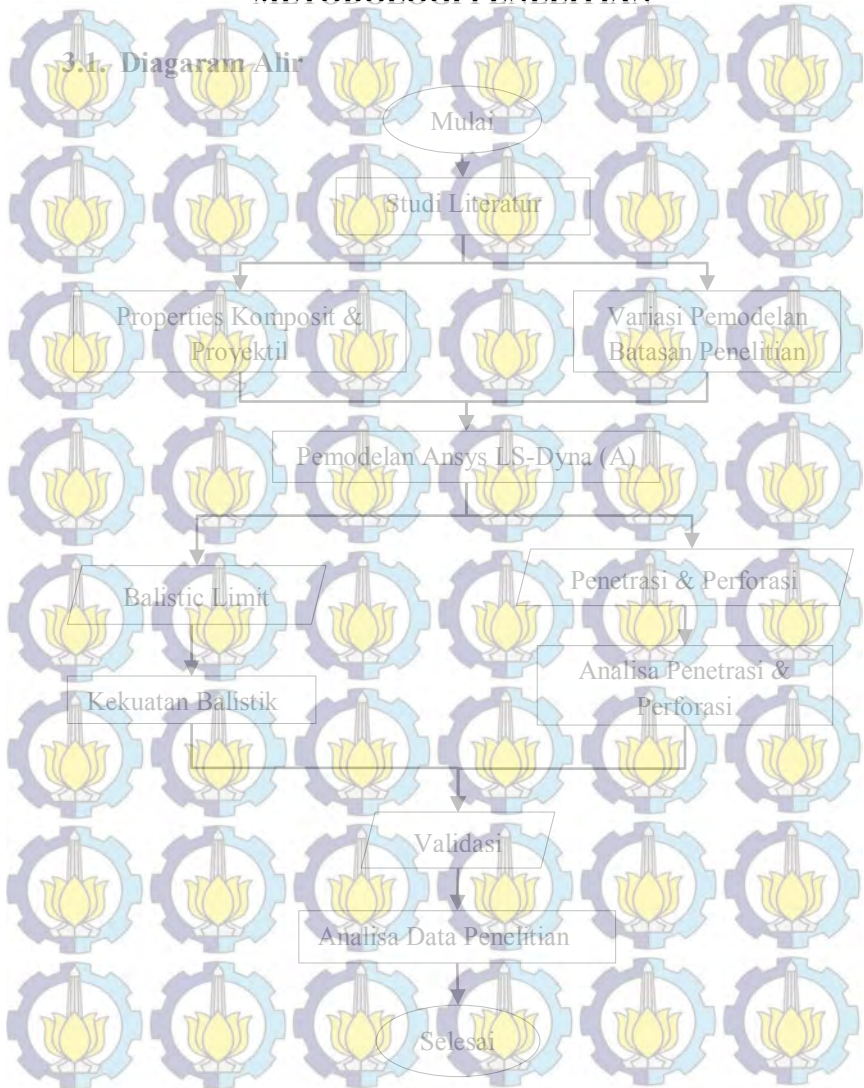
		performa balistik dari CL terjadi karena matriks PP membuat perbedaan mekanisme penyerapan energi. Untuk batas balistik & perforasi lebih tinggi pada CL dibanding AF.
9.	Judul	<i>Ballistic Performance of Hybrid 3D Woven: Experimentns and Simulation</i>
	Peneliti	R. Minoz; F. Martinez-Hergueta; F. Galvez
	Metode	Komposit dibuat dari resin epoksi vinylester menjadi 3D hybrid orthogonal woven. Empat layer pertama dibuat dari S2 serat kaca & 2 layer bawah dari AS4C serat karbon. Komposit berukuran 690x275mm dengan serat kaca S2 dan resin epoksi MTM44 dan arah serat $[(45/0/90)_2/0]_s$. Sepuluh plat 100x100mm dari komposit 2D dan 20 komposit hybrid 3D diuji dengan proyektil baja berbentuk <i>spherical</i> ukuran 5,5mm kaliber 0,22 dengan massa 0,706g dengan kecepatan $300-500\text{ms}^{-1}$. Proyektil dilepaskan menggunakan SABRE Al+gas gun dengan mengkompresi udara/helium pada tekanan 150 bar. XCT digunakan untuk memastikan mekanisme kerusakan. Untuk uji balistik pada komposit <i>hybrid</i> 3D disimulasi menggunakan metode elemen hingga dengan software ABAQUS dengan ukuran plat 100x100mm dan ditumpuk 7 layer (0,586mm/layer)
	Hasil	Terlihat bahwa energy disipasi dari komposit 3D <i>woven</i> saat diberi kecepatan impak rendah 2x lebih tinggi dari 2D. XCT

		menunjukkan 3 mekanisme energi disipasi selama uji balistik. Fiber sobek di bagian atas dan tengah lapisan, kerusakan pada matriks menghancurkan serta meretakkan proyektil. Akhirnya fiber rusak sampai lapisan akhir. Mekanisme ini sama seperti yang terjadi pada komposit 2D. Energi disipasi pada komposit 3D akan meningkat jika layer pertama yang ditumbuk adalah permukaan karbon karena serat kaca pada bagian bawah akan mengalami deformasi yang lebih besar sebelum rusak. Akhirnya uji impak disimulasi dengan metode elemen hingga dan memperlihatkan perbedaan kerusakan pada permukaan kaca & permukaan karbon.
10.	Judul	<i>Ballistic Impact Analysis of Balisa Core Sandwich Composite</i>
	Peneliti	N. Javer; B. Shafiq; U. Vaidya
	Metode	Komposit terdiri dari 0,95cm inti balsa, 3K tow & 0,25 serat karbon difabrikasi menggunakan <i>Vacuum Assisted Resin Transfer Molding</i> (VARTM). Diuji impak dengan menggunakan <i>spherical projectile</i> kaliber 0,3 ($r=3,8\text{mm}$) bermaterial paduan baja grade 25 dengan kekerasan 63-67 HRc (berat=2g). Selanjutnya diuji balistik dengan peralatan <i>single-stage-light-gas gun</i> dengan mengkompresi fluida nitrogen/helium. Komposit berukuran $15 \times 15 \text{cm}^2$ (<i>sandwich</i>).

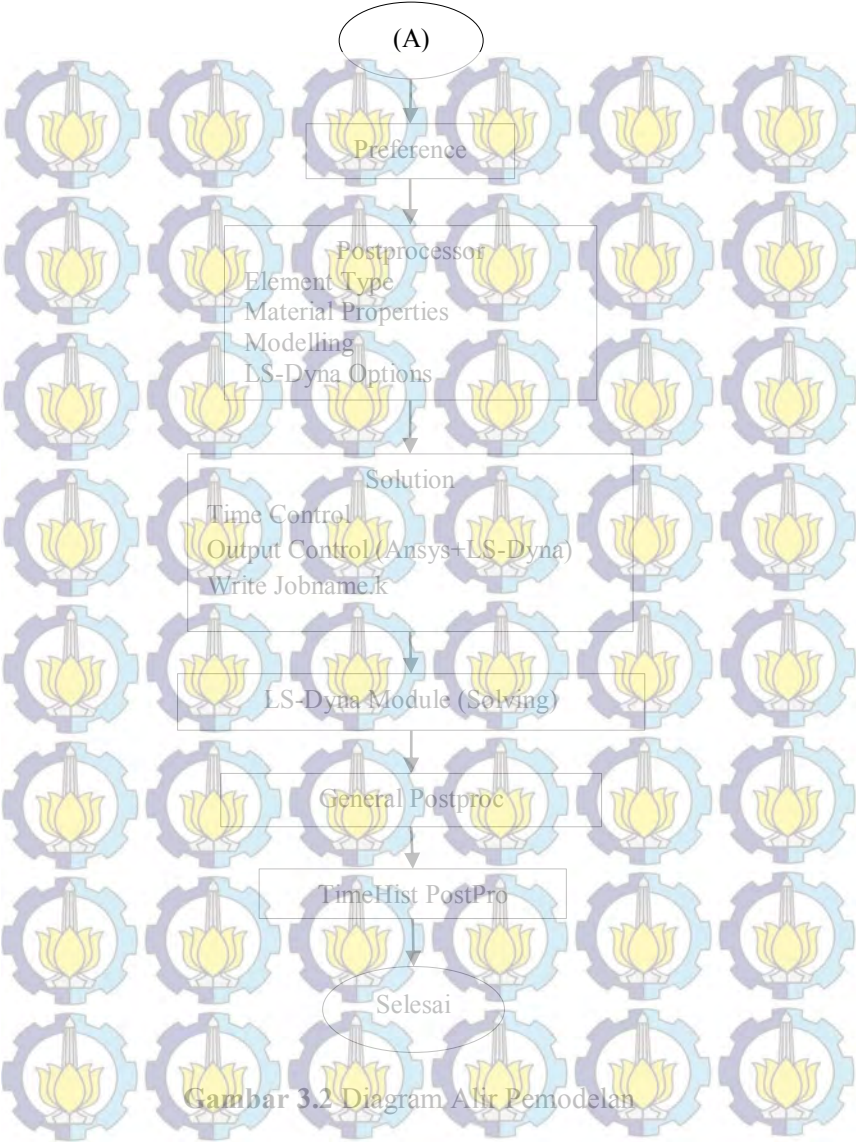
	Hasil	Batas balistiknya (V_{50}) adalah 96ms^{-1} , material dapat digunakan sebagai pelapis untuk melindungi dari ledakan, tornado dll. Efek sebelum kerusakan dan penyerapan energi menjadi lebih meningkat seiring bertambahnya pembebanan impak & tampak bahwa pembebanan impak awal hanya memberikan sedikit pengaruh terhadap respon global.
11.	Judul	<i>Simulation Of Influence Of Fiber Direction To Ballistic Impact Strength Of E-Glass/Isophthalic Polyester Composite</i>
	Peneliti	Panglevi, Rizal
	Metode	Komposit E-glass/Isophthalic-polyester disusun dengan konfigurasi 8, 12, 16 layer ditumbuk dengan menggunakan peluru standar NATO STANAG 2920 FSP kaliber 0,22 inch dengan material baja AISI 4340H. Peluru ditembakkan dengan kecepatan 355ms^{-1} dan diletakkan tepat akan menyentuh komposit. Menggunakan software Patran Nastran untuk mensimulasi impak balistik
	Hasil	Komposit E-glass/isophthalic polyester dengan arah serat [45/-45/rep] memiliki kekuatan balistik lebih tinggi 28,48 % dari pada komposit dengan arah serat [90/0/rep]. Proses validasi menggunakan model Wen dan menunjukkan nilai error pada komposit E-glass/isophthalic-polyester berkisar antara 2,63% sampai 8,74%.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Diagram Alir



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian



3.2. Spesifik Material

3.2.1. Material Komposit

Material komposit yang digunakan adalah serat kaca tipe E (*E-glass*) sebagai serat penguat dan isophthalic-polyester sebagai matriksnya dengan fraksi volum serat penguat sebanyak 36.51%. Semua proses manufaktur dan uji mekanik dilakukan oleh perusahaan “X”. Untuk sifat mekanik komposit *E-glass Isophthalic-polyester* disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Sifat mekanik komposit E-glass/Isophthalic-polyester berdasarkan ASM Handbook vol 21

Sifat Mekanik	DCMU
	<i>Unidirectional</i>
Modulus Young arah x (GPa) E1	25.8
Modulus Young arah y (GPa) E2	8
Modulus Young arah z (GPa) E3	8
Poisson Ratio arah yx	0.09
Poisson Ratio arah zx	0.09
Poisson Ratio arah zy	0.29
Modulus geser arah xy (GPa)	8.4
Modulus geser arah yx (GPa)	3.1
Modulus geser arah xy (GPa)	8.4
Densitas (Kg/m^3)	1680

3.2.2. Material Proyektil

Material yang digunakan untuk proyektil adalah kuningan dengan sifat mekanik berdasarkan pada jurnal yang diteliti oleh N.A. Alallak dan S.S. Sarhan (2011) serta James M. Gere dan Stephen P. Timoshenko (1997), seperti pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Sifat Mekanik Proyektil

Massa Jenis (kg/m^3)	11340
Modulus Young arah x (GPa) Ex	16E9
Poisson Ratio arah xy	0.44

3.3. Parameter Uji Impak Balistik

Parameter yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah:

- Komposit memiliki orientasi serat [0/90/rep] dan [45/-45/rep]
- Kecepatan peluru yang akan digunakan adalah 300 m/s, 500m/s & 800m/s

3.4. Peralatan

Proses penelitian yang dilakukan menggunakan peralatan berupa perangkat lunak atau *software* sebagai berikut :

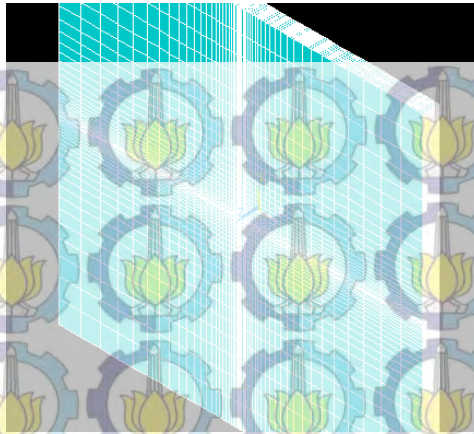
1. Ansys Mechanical APDL+LS-DYNA modul
Ansys Mechanical APDL digunakan untuk memodelkan material dan pembebanan sedangkan modul LS-DYNA digunakan untuk memasukkan kriteria erosi.

3.5. Proses Penelitian

3.5.1 Pemodelan Komposit E-Glass/Isophthalic Polyester

Komposit E-glass/isophthalic-polyester terdiri dari 8, 12, dan 16 layer dengan masing-masing layer yang memiliki geometri $0,1\text{m} \times 0,1\text{m} \times 0,00057\text{m}^3$

Metode *Meshing* yang digunakan adalah *Sweep* (lihat Gambar 3.2) dengan elemen *hexahedron*. Ukuran elemen memiliki kerapatan yang seragam pada semua permukaan yakni 2mm dengan rasio -0,05 untuk mendapatkan rapat tengah (lihat Gambar 3.3).

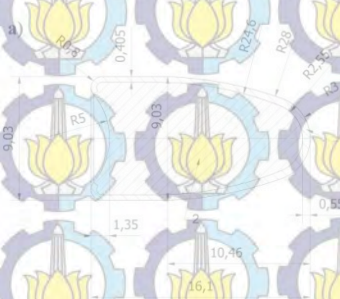


Gambar 3.3 Meshing pada komposit

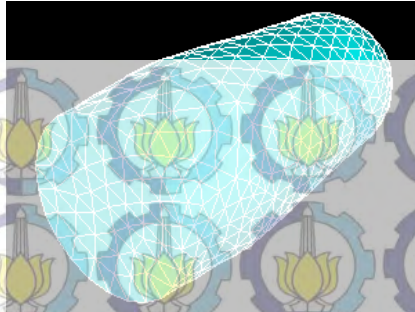
Jenis material yang digunakan untuk setiap layer adalah orthotropik dengan kriteria kegagalan Chang-Chang

3.5.2. Pemodelan Projektil

Projektil peluru dimodelkan sesuai dengan standar NIJ Standard-0101.04, “Ballistic Resistance of Personal Body Armour”, seperti pada Gambar 3.4. Untuk versi CAD-nya, lebih jelas lihat pada Gambar 3.4. Jenis elemen yang digunakan adalah solid elemen tetrahedron dengan ukuran elemen 1 seperti pada Gambar 3.5.



Gambar 3.4 Peluru kaliber 9mm standar NIJ

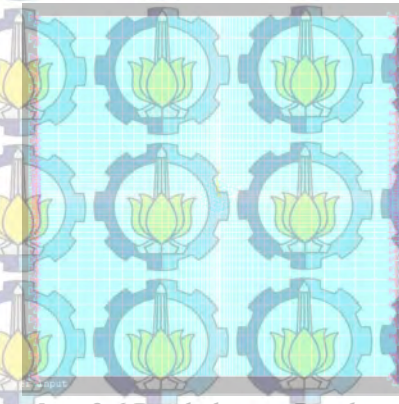


Gambar 3.5 Elemen tetrahedron proyektil

Jenis material yang digunakan adalah *solid 164* dengan tipe material *orthotropic* untuk komposit, dan *solid 168* rigid untuk proyektil peluru (Gambar 3.5).

3.6. Pemodelan Kondisi Pembebanan

Pemodelan kondisi pembebanan pada penelitian ini meliputi kecepatan awal, *displacement* dan kontak. Pada penelitian ini menggunakan kecepatan yang bervariasi. Kondisi pembebanan *displacement* ini diterapkan untuk menahan pergerakan baik secara translasi maupun rotasi pada sisi tepi luar komposit dengan cara menahan node di tiap sudut terluar komposit seperti Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Pembebanan *Displacement*

Metode kontak yang digunakan adalah *surface to surface*. Sehingga proyektil disebut sebagai kontak komponen dan komposit disebut sebagai target komponen. Kontak antara permukaan proyektil dengan permukaan komposit menggunakan *surface to surface eroding contact*. Sedangkan kontak antar layer komposit menggunakan *devide contact* dengan tipe *hourglass 2*.

Gambar 3.7 Pemodelan kontak

3.7. Perhitungan Validasi

Perhitungan untuk validasi hasil analisa Ansys menggunakan teori Wen. Berbagai data untuk menghitung batas balistik disubstitusikan pada persamaan 2.32.



BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Elemen Hingga

Variabel yang digunakan dalam pemodelan ini adalah variasi arah serat (0°) dan ($\pm 45^\circ$) dan variasi kecepatan yakni 300m/s, 500m/s dan 800m/s. Arah serat pada komposit dan kecepatan proyektil divariasikan untuk mengetahui pengaruh arah serat dan kecepatan proyektil terhadap kekuatan impact balistik komposit E-glass/isophthalic-polyester. Sifat mekanik untuk satu layer komposit E-glass/isophthalic-polyester disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Konstanta komposit Sesuai Variasi Arah Serat

	Konstanta Komposit			
	0°	90°	45°	-45°
$E_1(\text{GPa})$	0,720	0,070	0,497	0,293
$E_2(\text{GPa})$	0,070	0,720	0,293	0,497
$E_3(\text{GPa})$	0,070	0,070	0,070	0,070
ν_{12}	0,351	0,122	0,379	0,093
ν_{23}	0,122	0,351	0,093	0,379
ν_{13}	0,122	0,122	0,122	0,122

Konstanta komposit modulus elastisitas arah normal (E_3) pada Tabel 4.1 ditentukan berdasarkan asumsi isotropik transversal. Selain konstanta komposit, kekuatan komposit juga divariasikan sesuai dengan variasi arah serat seperti pada Tabel 4.2. Kekuatan komposit arah normal (Z_T dan Z_C) ditentukan berdasarkan asumsi bahwa layer komposit merupakan material isotropik transversal yang memiliki sifat identik pada arah pembebanan normal dan transversalnya.

Tabel 4.2 Kekuatan Komposit Sesuai Variasi Arah Serat

	Kekuatan (GPa)			
	0°	90°	45°	-45°
X_T	0,720	0,070	0,497	0,293

Y_T	0,070	0,720	0,293	0,497
Z_T	0,070	0,070	0,070	0,070
X_C	0,351	0,122	0,379	0,093
Y_C	0,122	0,351	0,093	0,379
Z_C	0,122	0,122	0,122	0,122
S_{12}	0,102	0,102	0,325	0,325
S_{23}	0,051	0,102	0,036	0,108
S_{13}	0,102	0,051	0,108	0,036

Konstanta dan kekuatan komposit pada Tabel 4.1 dan 4.2 digunakan untuk memenuhi kriteria kegagalan Chang-Chang. Terdapat 18 komposit yang dimodelkan yakni komposit layer 8, 12 dan 16 dengan dua variasi arah serat, yaitu $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$ dan untuk tiap arah serat tersebut divariasikan lagi kecepatan proyektil yang menumbuk yakni 300m/s, 500m/s dan 800m/s.

Kriteria Chang-Chang yang digunakan untuk memodelkan komposit tidak dapat memodelkan kerusakan. Sehingga perlu ditambahkan kriteria erosi yang berfungsi mengeliminasi elemen apabila mencapai nilai kriteria erosi yang ditentukan. Penambahan kriteria erosi ini menggunakan modul LS-Dyna dengan kriteria erosi yang digunakan adalah regangan efektif, regangan volume dan regangan prinsipal serat kaca tipe E, yaitu 0,048.

Tabel 4.3 Regangan volume arah serat 0,90 dan 45,-45

Arah Serat	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{vol}
0°	0,0263	-0,0001305	-0,001881	0,0243209
90°	0,0055	0,02458198	-0,001881	0,0281523
45°	0,0290	0,0146237	-0,009974	0,0336461
-45°	0,0146	0,02899643	-0,009974	0,0336461

Tabel 4.4 Regangan efektif layer arah serat 0,90 dan 45,-45

Arah Serat	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	ϵ_{eff}
0°	0,0263	-0,0001305	-0,001881	0,03341322

90°	0,0055	0,02458198	-0,001881	0,03493534
45°	0,0290	0,01462370	-0,009974	0,04656265
-45°	0,0146	0,02899643	-0,009974	0,04656265

4.2. Hasil Pemodelan Pada Variasi Kecepatan Peluru

4.2.1. Kecepatan 300m/s

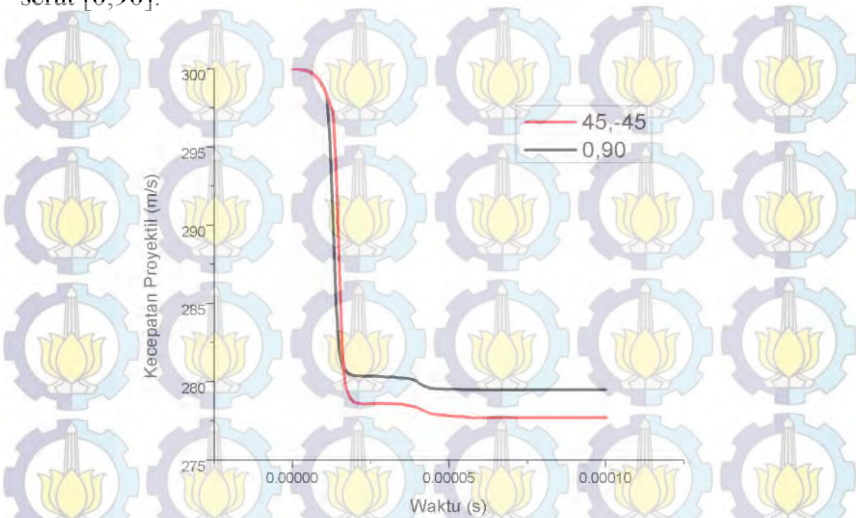
4.2.1.1 Komposit 8 Layer [± 45] dan [0,90]

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat [± 45] dan [0,90] 8 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 300m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan dampak Gambar 4.1. Alur penurunan grafik pada Gambar 4.1 menunjukkan komposit sedang mengalami perforasi oleh proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan proyektil telah selesai melakukan perforasi.

Pada Gambar 4.1 tersebut memperlihatkan komposit arah serat [± 45] dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 300 m/s hingga menjadi 277,736 m/s. Sedangkan komposit arah serat [0,90] dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 300 m/s menjadi 279,469 m/s. Dari Gambar 4.1 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat [± 45] dan [0,90] 8 layer. Tabel 4.5 menunjukkan komposit dengan arah serat [± 45] 8 layer untuk kecepatan awal 300 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 7,784% dari pada komposit dengan arah serat [0,90] 8 layer. Batas kecepatan balistik (V_b) merupakan batas kecepatan yang dapat ditahan oleh komposit yang dapat diperoleh dengan mengambil selisih antara kecepatan awal (V_0) dengan kecepatan setelah perforasi (V_p).

Batas kecepatan balistik juga sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Lama waktu yang dibutuhkan proyektil untuk melakukan perforasi secara total (t_{tot}) dapat diketahui dari selisih antara waktu proyektil tepat sebelum melakukan tumbukan (t_0) dengan waktu setelah melakukan perforasi (t_p). Tabel 4.6 menunjukkan bahwa komposit arah serat

[±45] mengalami perforasi lebih lama dari pada komposit arah serat [0,90].



Gambar 4.1 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat [±45] dan [0,90] 8layer 300m/s

Tabel 4.5 Batas kecepatan balistik komposit arah serat [±45] dan [0,90] 8 layer 300m/s

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
[±45]	300	277,736	22,264
[0,90]	300	279,469	20,531

Tabel 4.6 Waktu perforasi total komposit arah serat [±45] dan [0,90] 8 layer 300m/s

Arah Serat	t_0 (s)	t_p (s)	t_{tot} (s)
[±45]	2.97E-6	0,45E-4	4,203E-5
[0,90]	2.97E-6	0,4E-4	3,703E-5

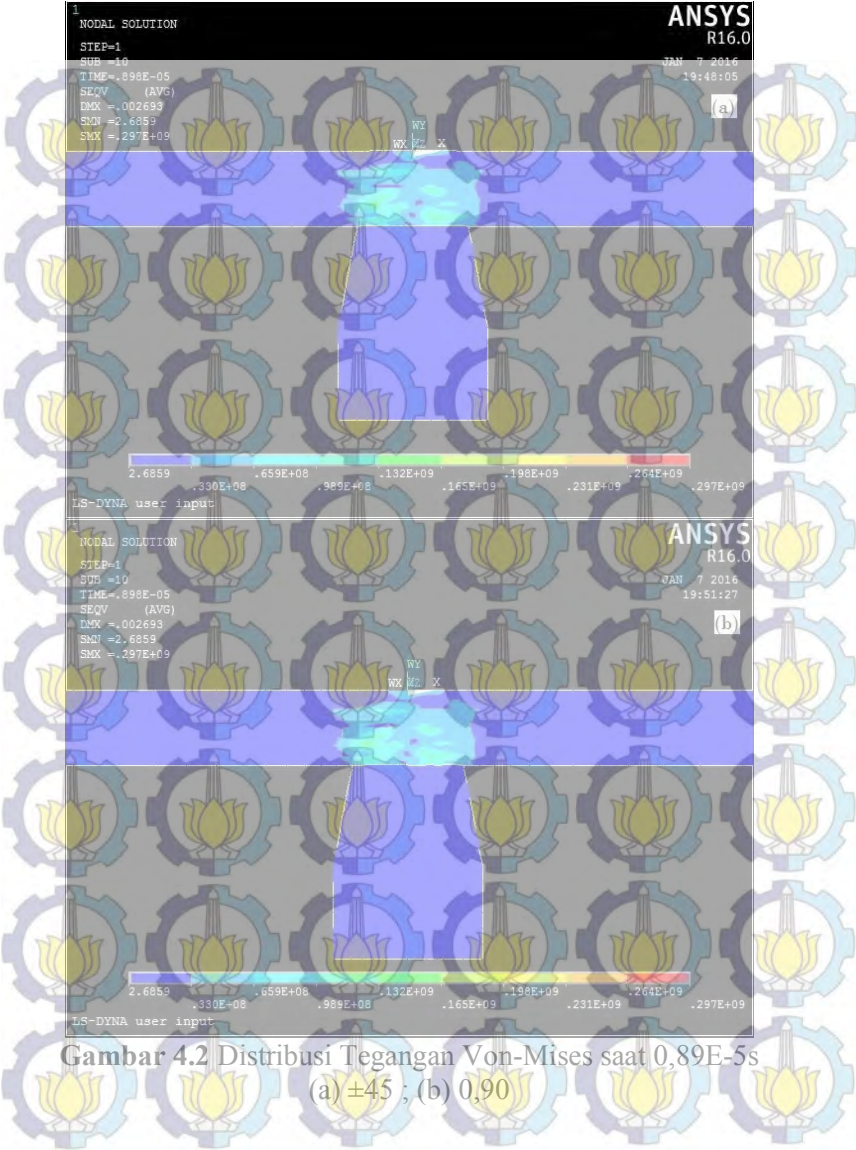
Pada Gambar 4.2 sampai 4.4 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$ 8 layer pada waktu yang sama, yaitu $0,89\text{E}-5\text{s}$, $0,14\text{E}-4\text{s}$ dan $0,17\text{E}-4\text{s}$.

Pada waktu $0,89\text{E}-5\text{s}$ (lihat Gambar 4.2) komposit arah serat $[\pm 45]$ & $[0, 90]$ sama-sama mengalami tegangan Von-Mises maksimum sebesar $0,297\text{GPa}$. Hal ini dimungkinkan karena jarak proyektil dan komposit adalah sama yakni $0,57\text{mm}$ serta kecepatan peluru yang sama pula yakni 300m/s .

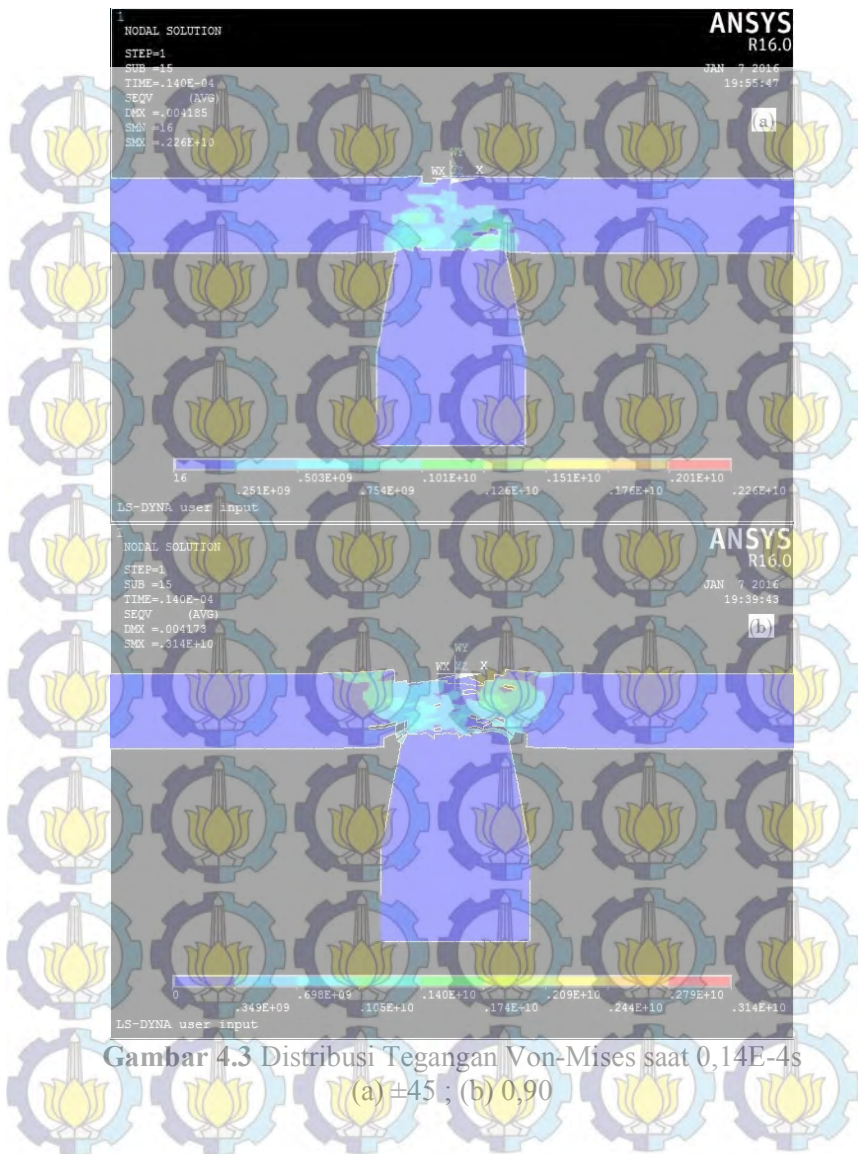
Berbeda dengan waktu $0,89\text{E}-5\text{s}$, pada waktu $0,14\text{E}-4\text{s}$ komposit arah serat $[\pm 45]$ baru mengalami tegangan Von-Mises maksimum $2,26\text{ GPa}$. Sedangkan pada komposit arah serat $[0, 90]$ sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar $3,14\text{ GPa}$ (Gambar 4.3). Hal ini menyebabkan komposit arah serat $[0, 90]$ lebih cepat mengalami kerusakan.

Pada waktu $0,17\text{E}-4\text{s}$ hal serupa juga terjadi, yaitu tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu $2,43\text{ GPa}$ dari pada komposit arah serat $[0, 90]$, yaitu $1,63\text{ GPa}$. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ masih mengalami perforasi. Sedangkan komposit arah serat $[0, 90]$ sudah hampir selesai mengalami perforasi (lihat Gambar 4.4).

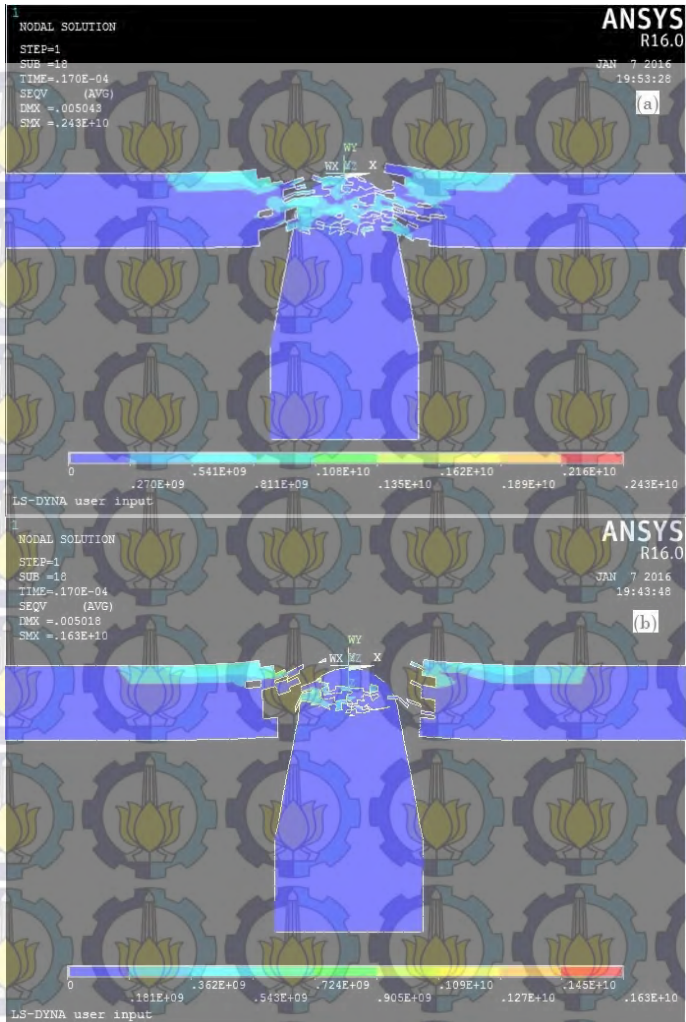
Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh terhadap banyaknya energi kinetik yang dapat diserap komposit. (Gambar 4.5)



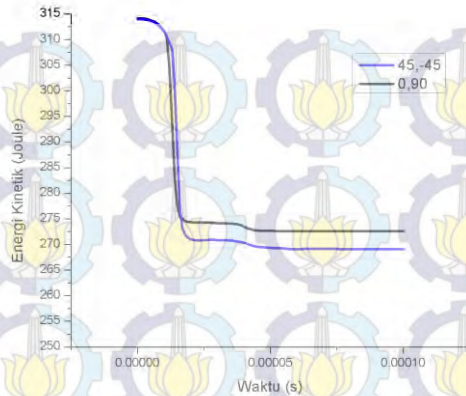
Gambar 4.2 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0.89E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) 0.90



Gambar 4.3 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,14E-4s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.4 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,17E-4s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.5 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer 300m/s

Alur penurunan grafik pada Gambar 4.5 menunjukkan komposit sedang menyerap energi kinetik proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan komposit sudah tidak dapat menampung energi kinetik proyektil.

Gambar 4.5 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ 300m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 44,899J, Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ 300m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 41,521J.

Tabel 4.7 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[90,0]$ 8 layer 300m/s

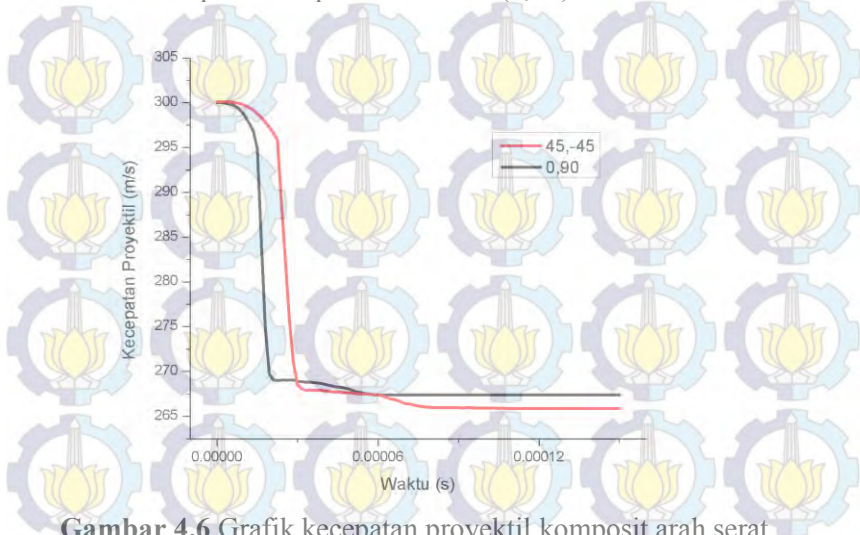
Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
$[\pm 45]$	314,1	269,201	44,899
$[0,90]$	314,1	272,579	41,521

Tabel 4.7 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ 300m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 7,5% dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

4.2.1.2 Komposit 12 Layer $[\pm 45]$ dan $[0,90]$

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 300m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan impact. Gambar 4.6 memperlihatkan komposit arah serat $[\pm 45]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 300 m/s hingga menjadi 265,757 m/s. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 300 m/s menjadi 267,402m/s. Dari Gambar 4.6 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer.

Tabel 4.8 menunjukkan komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 12 layer untuk kecepatan awal 300 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 4,8% dari pada komposit dengan arah serat $[0,90]$ 12 layer. Batas kecepatan balistik sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Tabel 4.9 menunjukkan bahwa komposit arah serat (± 45) mengalami waktu perforasi yang lebih lama daripada komposit arah serat $(0,90)$.



Gambar 4.6 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 300m/s

Tabel 4.8 Batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 300m/s

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
$[\pm 45]$	300	265,757	34,243
$[0,90]$	300	267,402	32,598

Tabel 4.9 Waktu perforasi total komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer kecepatan 300m/s

Arah Serat	t_0	t_p	t_{tot}
$[\pm 45]$	2,97E-6	5,299E-5	5E-5
$[0,90]$	2,97E-6	5,098E-5	4,8E-5

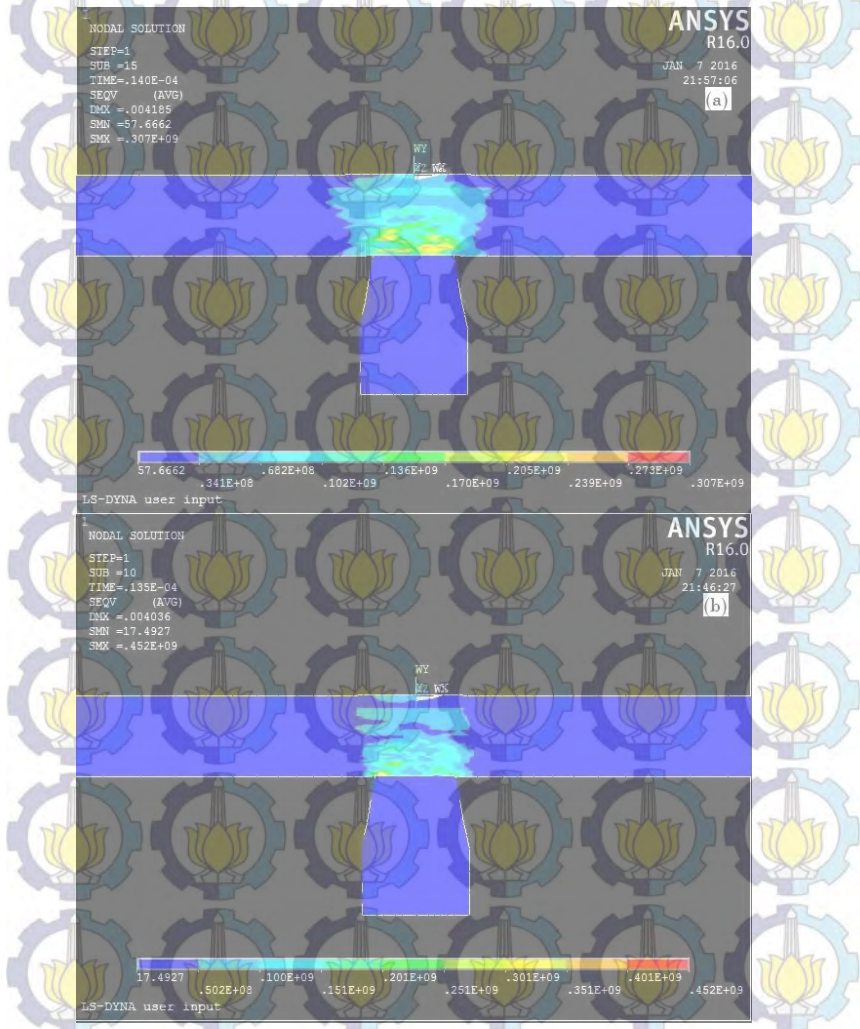
Pada Gambar 4.7 sampai 4.9 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer pada waktu yang sama, yaitu 1,4E-5s, 1,7E-5s dan 2,1E-5s.

Pada waktu 1,4e-5s (lihat Gambar 4.7) komposit arah serat $[\pm 45]$ baru mengalami tegangan Von-Mises maksimum 0,307 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat $[0,90]$ sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar 0,452 GPa. Hal ini menyebabkan komposit arah serat $[0,90]$ lebih cepat mengalami kerusakan.

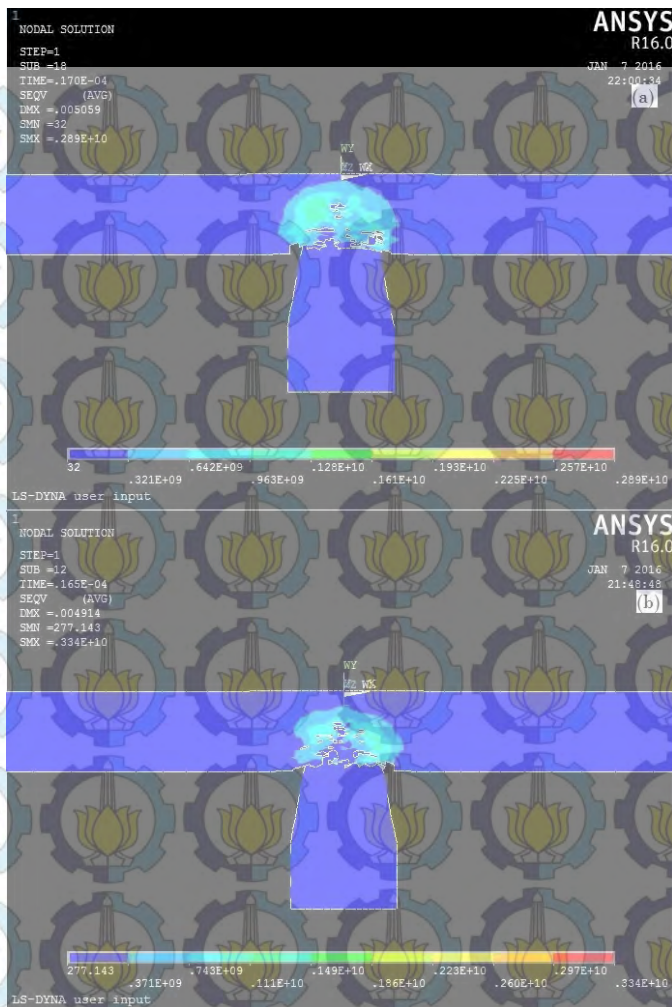
Berbeda dengan waktu 1,4E-5s, pada waktu 1,7E-5s (Gambar 4.8) tegangan maksimum Von-Mises pada komposit arah serat $[\pm 45]$ justru menjadi lebih kecil, yaitu 2,89 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 3,94 GPa seperti pada Gambar 4.8. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lambat dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

Pada waktu 2,1E-5s tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu 1,83 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 1,78 GPa. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ masih mengalami perforasi. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ sudah hampir selesai mengalami perforasi (lihat Gambar 4.9).

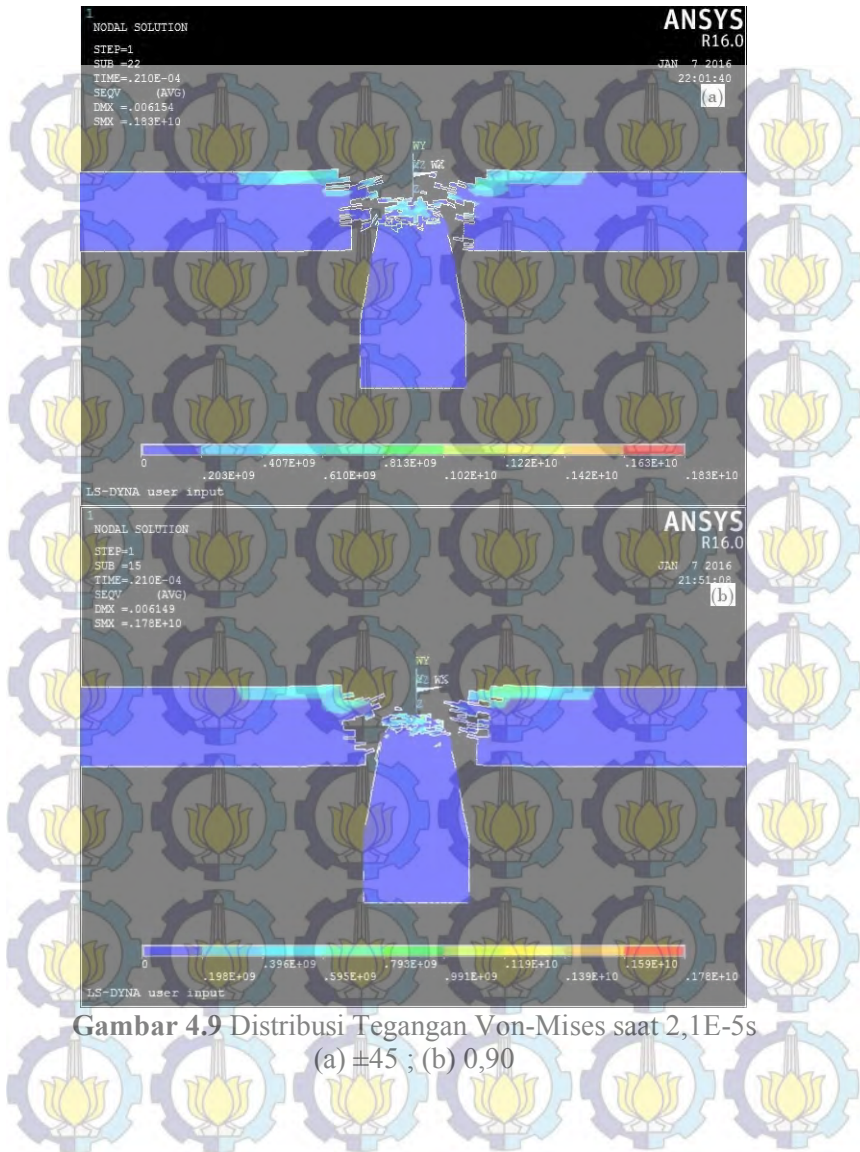
Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh pada banyaknya energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit seperti Gambar 4.10.

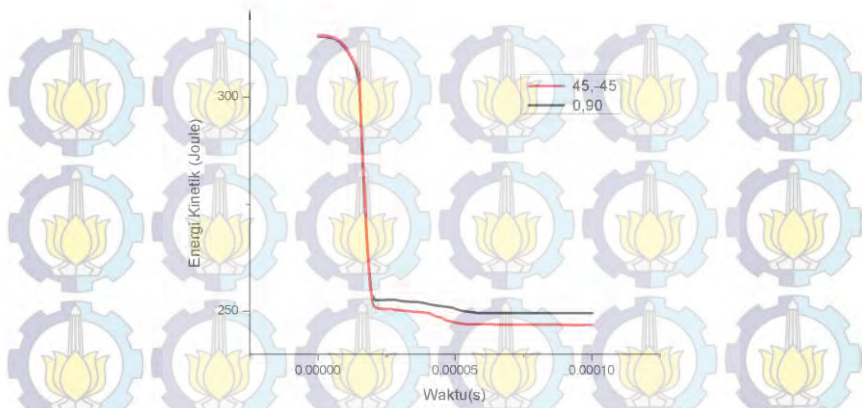


Gambar 4.7 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,4E-5s
(a) ± 45 ; (b) 0,90



Gambar 4.8 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $1,7\text{E}-5\text{s}$
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$





Gambar 4.10 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$ 12 layer 300m/s

Alur penurunan grafik pada Gambar 4.10 menunjukkan komposit sedang menyerap energi kinetik proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan komposit sudah tidak dapat menampung energi kinetik proyektil.

Gambar 4.10 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ 300m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 67,6125J, Sedangkan komposit arah serat $[0, 90]$ 300m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 64,55J.

Tabel 4.10 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[90, 0]$ 12 layer

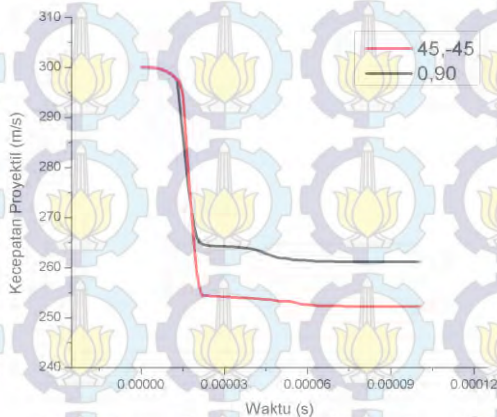
Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
$[\pm 45]$	314.1	246,4875	67,6125
$[0, 90]$	314.1	249,5484	64,55

Tabel 4.10 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ 300m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 4,53% dari pada komposit arah serat $[0, 90]$.

4.2.1.3 Komposit 16 Layer $[\pm 45]$ dan $[0,90]$

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 300 m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan impak Gambar 4.11. Gambar 4.11 memperlihatkan komposit arah serat $[\pm 45]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 300 m/s hingga menjadi 252,127 m/s. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 300 m/s menjadi 261,202 m/s. Dari Gambar 4.11 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer. Tabel 4.11 menunjukkan komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 8 layer untuk kecepatan awal 300 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 18,96% dari pada komposit dengan arah serat $[0,90]$ 8 layer.

Batas kecepatan balistik sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Tabel 4.12 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lama dari pada komposit arah serat $[0,90]$.



Gambar 4.11 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 300m/s

Tabel 4.11 Batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
$[\pm 45]$	300	252,127	47,873
$[0,90]$	300	261,202	38,798

Tabel 4.12 Waktu perforasi total komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 300m/s

Arah Serat	t_0 (s)	t_p (s)	t_{tot} (s)
$[\pm 45]$	2,97E-6	5,699E-5	5,4E-5
$[0,90]$	2,97E-6	5,299E-5	5E-5

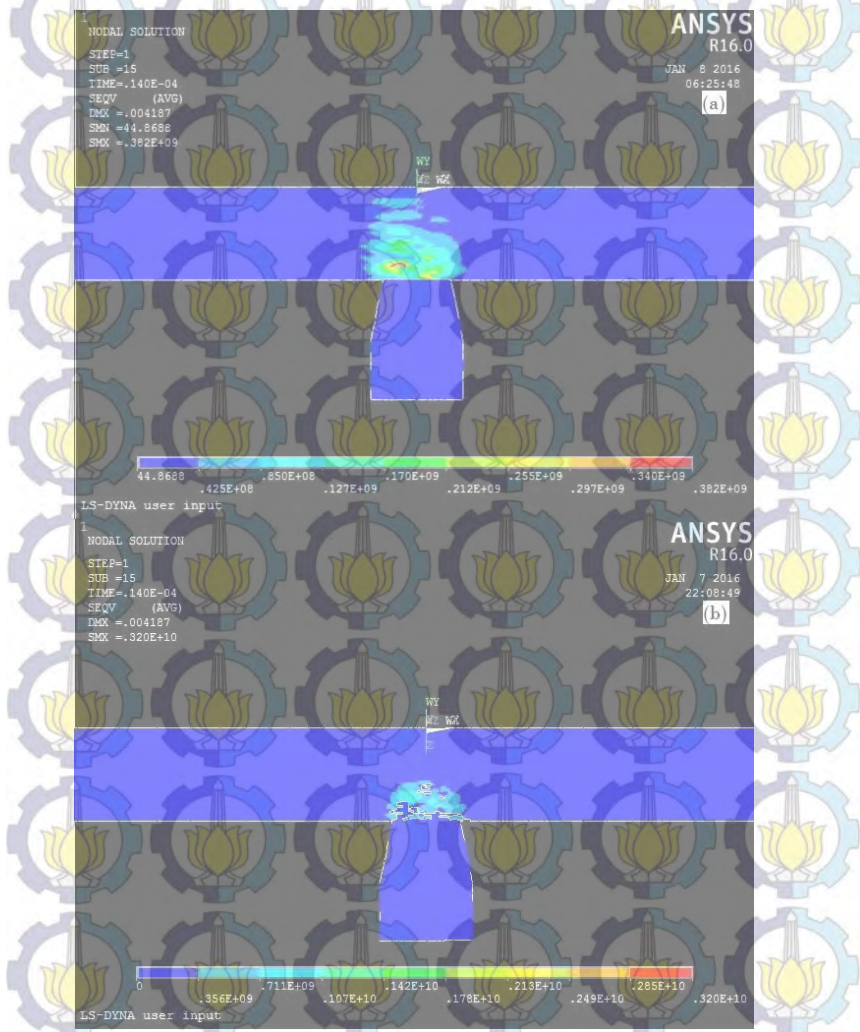
Pada Gambar 4.12 sampai 4.14 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer pada waktu yang sama, yaitu 1,4E-5s, 1,8E-5s dan 2,0E-4s.

Pada waktu 1,4E-5s (lihat Gambar 4.12) komposit arah serat $[\pm 45]$ baru mengalami tegangan Von-Mises maksimum 0,382 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat $[0,90]$ sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar 3,20 GPa. Hal ini menyebabkan komposit arah serat $[0,90]$ lebih cepat mengalami kerusakan.

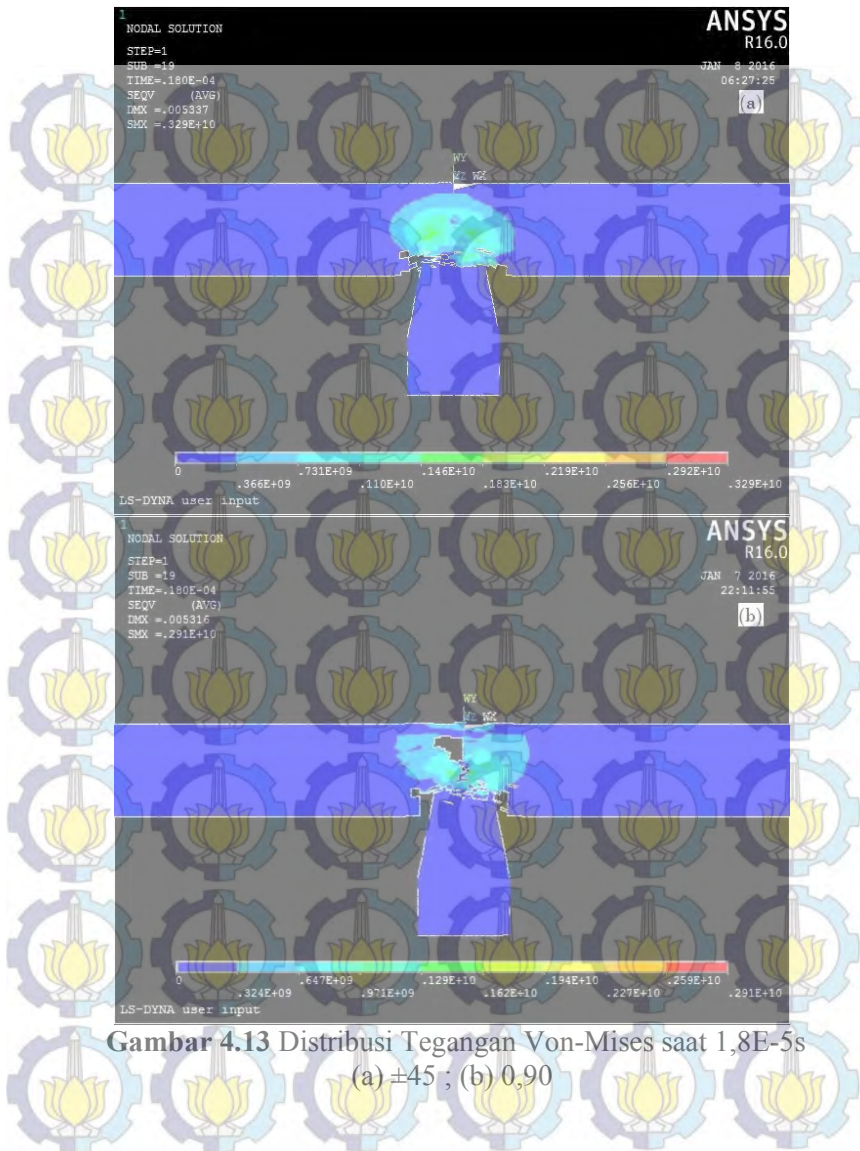
Berbeda dengan waktu 1,4E-5s, pada waktu 1,8E-5s (Gambar 4.13) tegangan maksimum Von-Mises pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu 3,29 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 2,91 GPa seperti pada Gambar 4.13. Hal ini juga menunjukkan bahwa untuk merusak komposit arah serat $[\pm 45]$ memerlukan tegangan Von-Mises yang lebih tinggi.

Pada waktu 2,0E-4s hal serupa juga terjadi, yaitu tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu 4,36 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 2,55 GPa. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ masih mengalami perforasi. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ sudah hampir selesai mengalami perforasi (lihat Gambar 4.14).

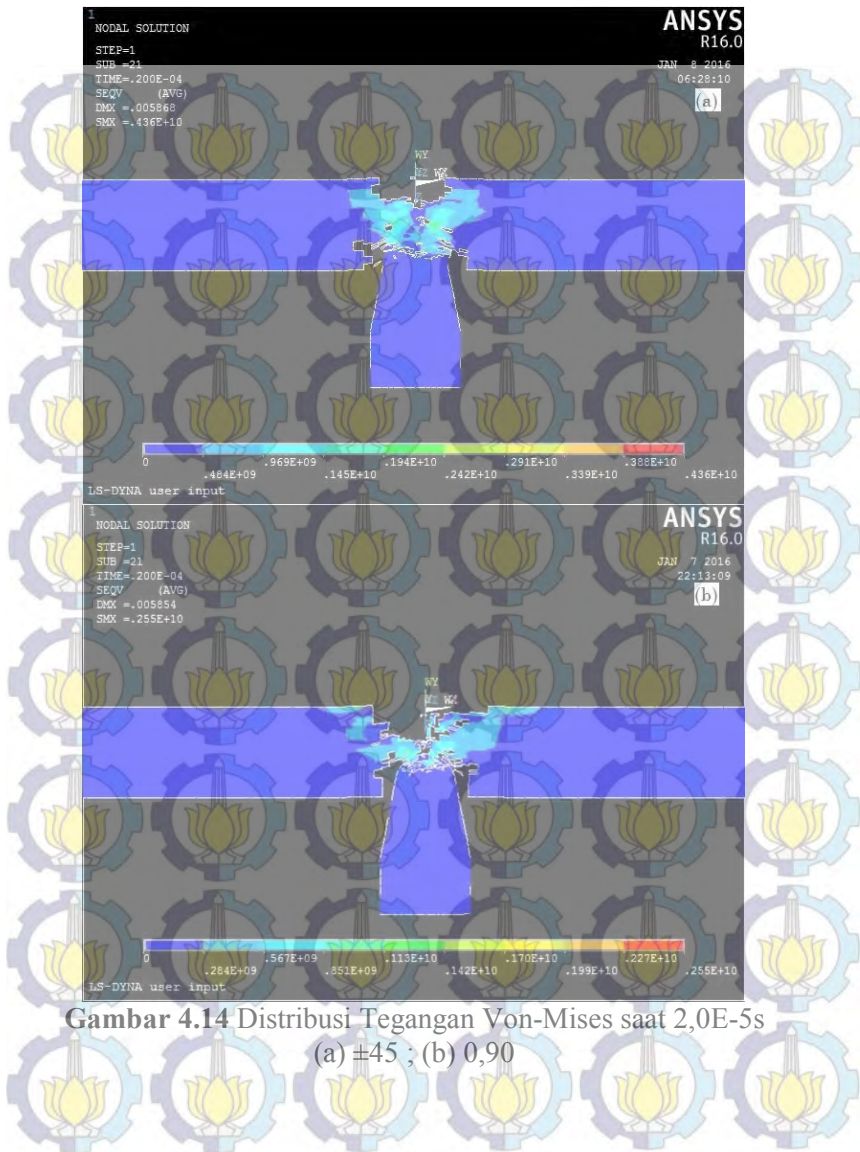
Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh pada banyaknya energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit seperti Gambar 4.15.



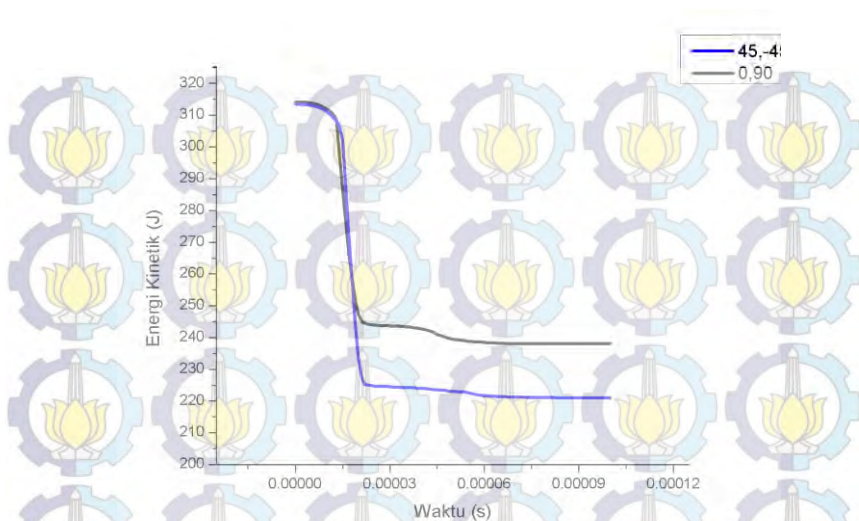
Gambar 4.12 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,4E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.13 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,8E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) 0,90



Gambar 4.14 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 2,0E-5s
 (a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.15 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit [± 45] dan [0,90] 16 layer 300m/s

Gambar 4.15 menunjukkan komposit arah serat [± 45] 300m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 92,2476J. Sedangkan komposit arah serat [0,90] 300m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 75,9896J.

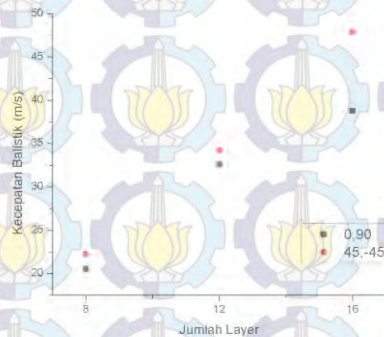
Tabel 4.13 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat [± 45] dan [90,0] 16 layer 300m/s

Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
[± 45]	314.1	221,8524	92,2476
[0,90]	314,1	238,1104	75,9896

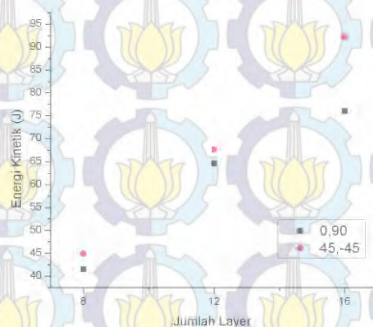
Tabel 4.13 menunjukkan bahwa komposit arah serat [± 45] 300m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 17,62% dari pada komposit arah serat [0,90].

4.2.1.4. Perbandingan Hasil Pemodelan Komposit 8, 12 dan 16 Layer kecepatan 300m/s

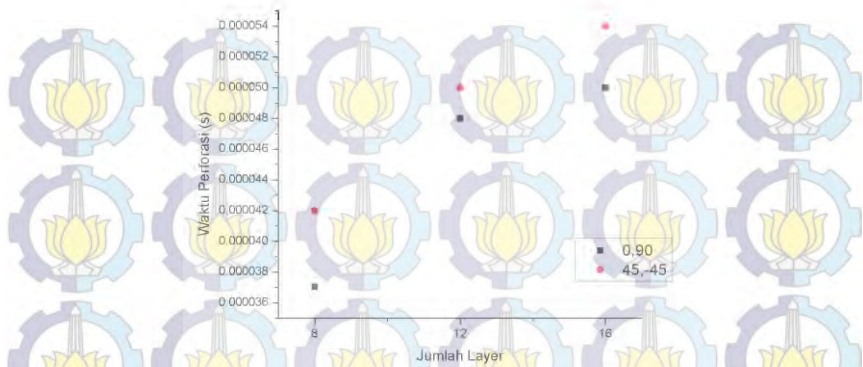
Setelah membahas satu-persatu hasil pemodelan baik pada komposit arah serat $[\pm 45]$ maupun $[0, 90]$ dengan jumlah layer 8, 12 dan 16, dilakukan perbandingan hasil pemodelan dari komposit tersebut. Pada Gambar 4.16 sampai 4.18 disajikan perbandingan batas kecepatan balistik, energi kinetik proyektil terserap dan waktu perforasi pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$.



Gambar 4.16 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$ 300m/s



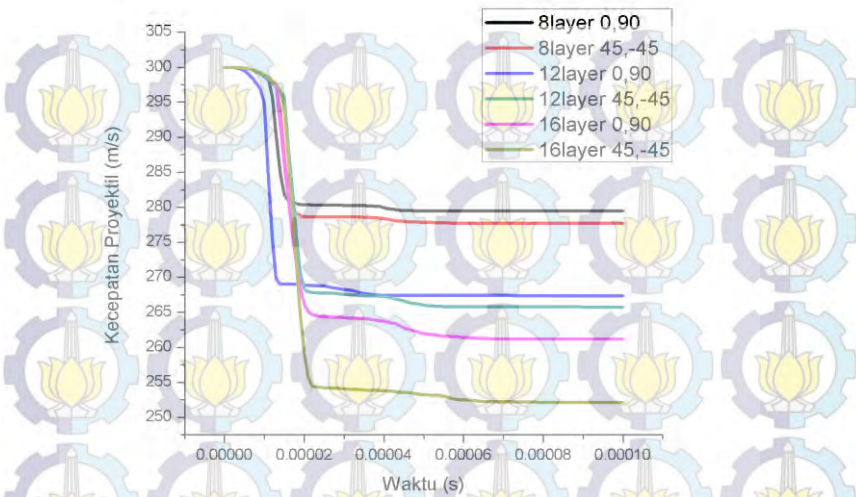
Gambar 4.17 Perbandingan energi kinetik proyektil yang terserap komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$ 300m/s



Gambar 4.18 Perbandingan waktu perforasi proyektil pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 300m/s

Gambar 4.16 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ memiliki batas kecepatan balistik secara keseluruhan lebih unggul 11,93 % dari pada komposit arah serat $[0,90]$. Gambar 4.17 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih banyak 11,1 % menyerap energi kinetik proyektil dari pada komposit arah serat $[0,90]$. Pada Gambar 4.18 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ memiliki waktu perforasi 7,55% lebih lama dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

Pada Gambar 4.19 disajikan perbandingan kecepatan proyektil selama perforasi. Terlihat bahwa komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 16 layer memiliki kemampuan paling unggul dalam menurunkan kecepatan proyektil, yaitu hingga 47,873m/s dan komposit dengan arah serat $[0,90]$ 8 layer memiliki kemampuan terendah dalam menurunkan kecepatan proyektil, yaitu hanya sampai 20,531m/s.

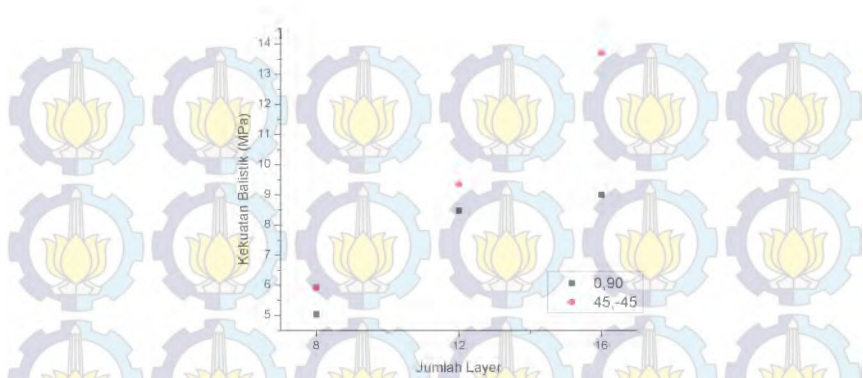


Gambar 4.19 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 300m/s

Kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ ditentukan menggunakan persamaan 2.34. Pada persamaan tersebut yang digunakan sebagai perhitungan adalah batas kecepatan balistik. Sehingga diperoleh kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ pada Tabel 4.14. Untuk lebih memperjelas perbedaan kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$, disajikan grafik pada Gambar 4.20.

Tabel 4.14 Kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 300m/s

Jml Layer	Arah Serat	Kekuatan Balistik (MPa)	Arah Serat	Kekuatan Balistik (MPa)
8	[±45]	5,93	[0,90]	5,04
12		9,35		8,47
16		13,70		9,00



Gambar 4.20 kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$

Gambar 4.20 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ memiliki kekuatan balistik lebih unggul 22,32% dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

4.2.2. Kecepatan 500m/s

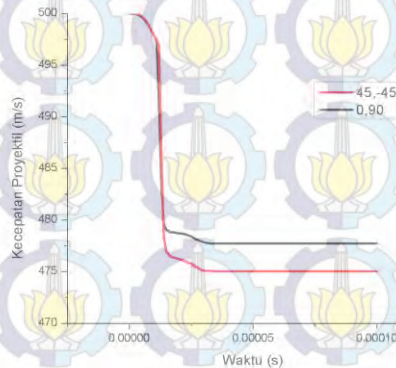
4.2.2.1 Komposit 8 Layer $[\pm 45]$ dan $[0,90]$

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 500m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan impact Gambar 4.21. Alur penurunan grafik pada Gambar menunjukkan komposit sedang mengalami perforasi oleh proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan proyektil telah selesai melakukan perforasi.

Gambar 4.21 memperlihatkan komposit $[90,0]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 500 m/s hingga menjadi 474,985 m/s. Sedangkan komposit arah serat $[\pm 45]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 500 m/s menjadi 477,733 m/s. Dari Gambar 4.21 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer. Tabel 4.15 menunjukkan komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 8 layer untuk

kecepatan awal 500 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 10,98% dari pada komposit dengan arah serat [0,90] 8 layer.

Batas kecepatan balistik sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Tabel 4.16 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lama dari pada komposit arah serat [0,90].



Gambar 4.21 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat $[\pm 45]$ dan [0,90] 500m/s

Tabel 4.15 Batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan [0,90] 8 layer 500m/s

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
$[\pm 45]$	500	474,985	25,015
[0,90]	500	477,733	22,267

Tabel 4.16 Waktu perforasi total komposit arah serat $[\pm 45]$ dan [0,90] 8 layer 500m/s

Arah Serat	t_0 (s)	t_p (s)	t_{tot} (s)
$[\pm 45]$	1,97E-6	3,190E-05	3E-5
[0,90]	1,97E-6	2,898E-05	2,693E-5

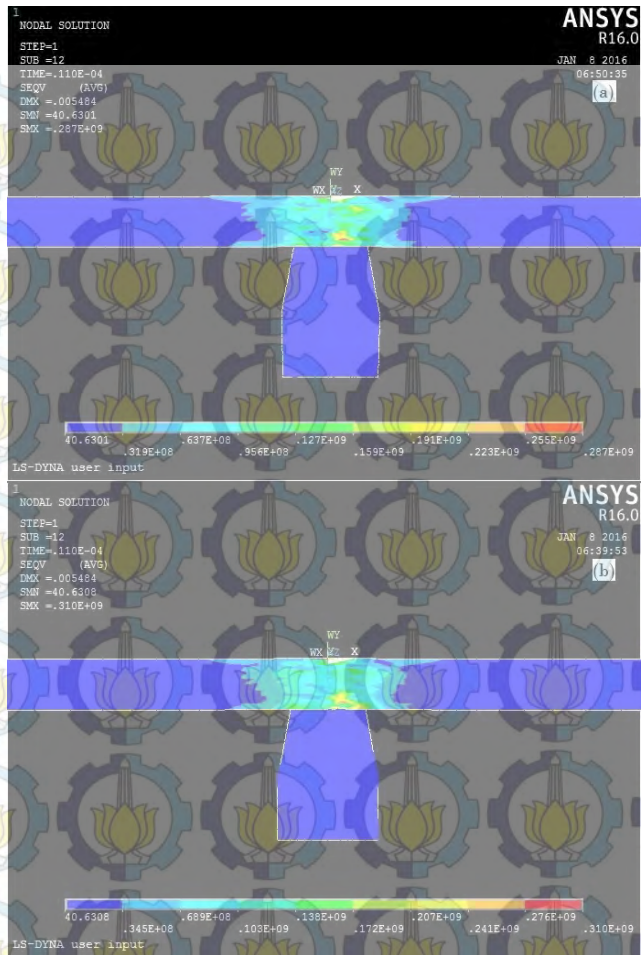
Pada Gambar 4.22 sampai 4.24 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$ 8 layer pada waktu yang sama, yaitu $1,1\text{E-}5\text{s}$, $1,2\text{E-}5\text{s}$ dan $1,4\text{E-}5\text{s}$.

Pada waktu $1,1\text{E-}5\text{s}$ (lihat Gambar 4.22) komposit arah serat $[\pm 45]$ baru mengalami tegangan Von-Mises maksimum $0,287\text{ GPa}$. Sedangkan pada komposit arah serat $[0, 90]$ sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar $0,310\text{ GPa}$. Hal ini menyebabkan komposit arah serat $[0, 90]$ akan mengalami kerusakan yang lebih cepat.

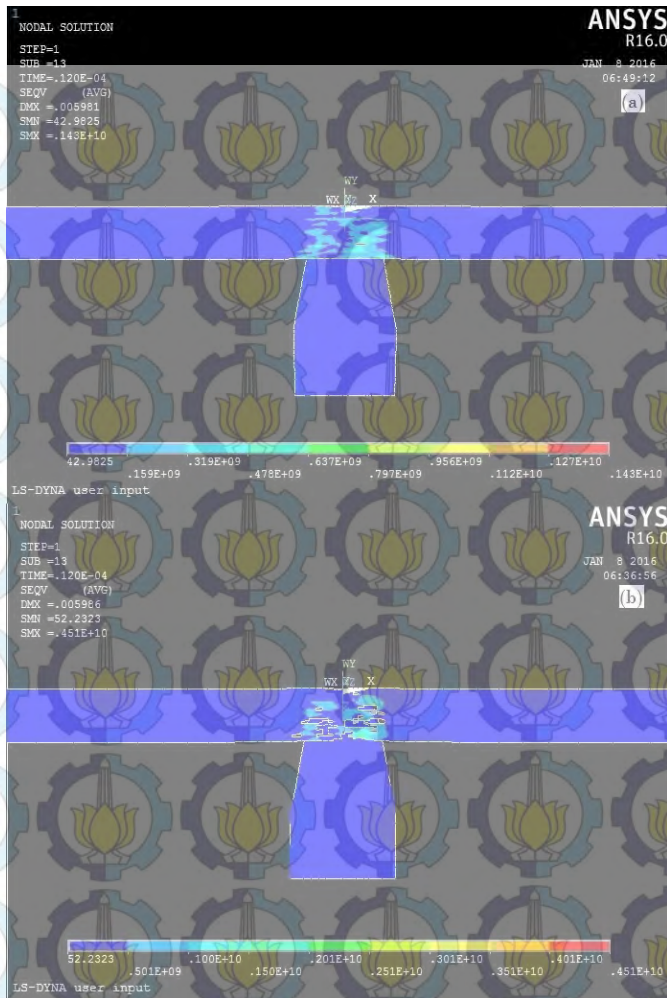
Berbeda dengan waktu $1,1\text{E-}5\text{s}$, pada waktu $1,2\text{E-}5\text{s}$ (Gambar 4.23) tegangan maksimum Von-Mises pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih kecil, yaitu $1,43\text{ GPa}$ dari pada komposit arah serat $[0, 90]$, yaitu $4,515\text{ GPa}$ seperti pada Gambar 4.23. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lambat dari pada komposit arah serat $[0, 90]$. Dapat dibuktikan pada Gambar, untuk komposit arah serat $[0, 90]$ telah mengalami kerusakan lebih dahulu.

Pada waktu $1,4\text{E-}5\text{s}$ hal serupa juga terjadi, yaitu tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu $2,73\text{ GPa}$ dari pada komposit arah serat $[0, 90]$, yaitu $2,20\text{ GPa}$. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ masih mengalami perforasi. Sedangkan komposit arah serat $[0, 90]$ sudah hampir selesai mengalami perforasi (lihat Gambar 4.24).

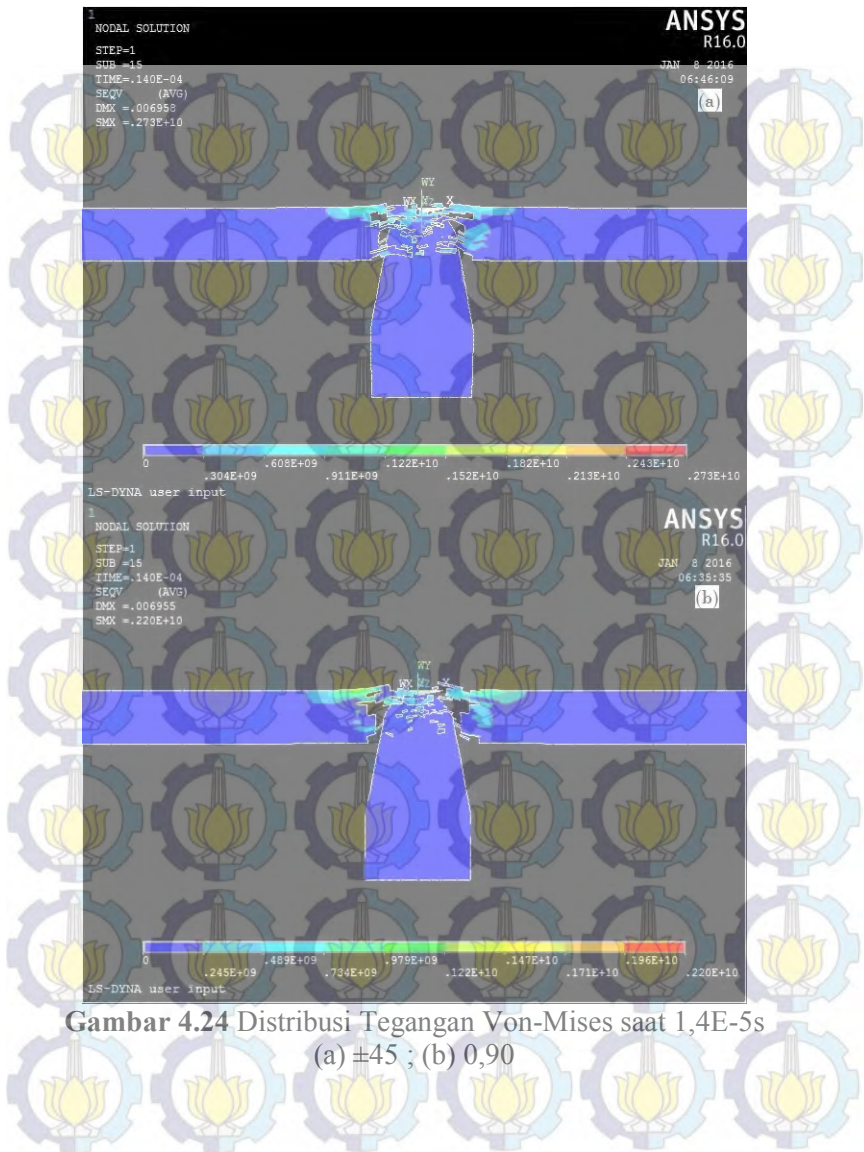
Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh pada banyaknya energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit seperti Gambar 4.25.



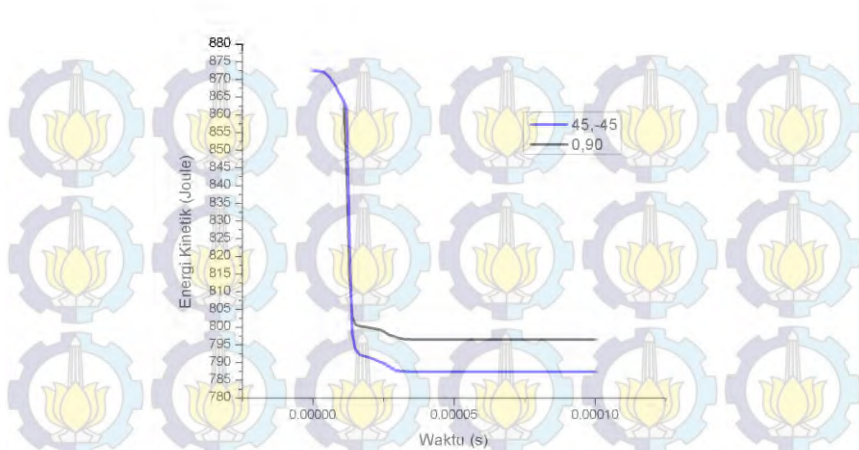
Gambar 4.22 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,1E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.23 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,2E-5s
 (a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.24 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,4E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.25 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$ 8 layer 500m/s

Alur penurunan grafik pada Gambar 4.25 menunjukkan komposit sedang menyerap energi kinetik proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan komposit sudah tidak dapat menampung energi kinetik proyektil.

Gambar 4.25 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ 500m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 85,1185J, sedangkan komposit arah serat $[0, 90]$ 500m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 75,9814J.

Tabel 4.17 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[90, 0]$ 8 layer 500m/s

Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
$[\pm 45]$	872,5	787,3815	85,1185
$[0, 90]$	872,5	796,5186	75,9814

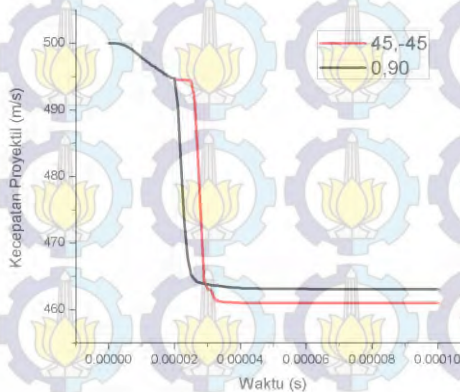
Tabel 4.17 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ 500m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 10,73% dari pada komposit arah serat $[0, 90]$.

4.2.2.2 Komposit 12 Layer $[\pm 45]$ dan $[0,90]$

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 500m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan impak Gambar 4.26. Alur penurunan grafik pada Gambar menunjukkan komposit sedang mengalami perforasi oleh proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan proyektil telah selesai melakukan perforasi.

Gambar 4.26 memperlihatkan komposit arah serat $[\pm 45]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 500 m/s hingga menjadi 461,02m/s. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 500 m/s menjadi 463,072 m/s. Dari Gambar 4.26 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer. Tabel 4.18 menunjukkan komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 12 layer untuk kecepatan awal 500 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 5,21% dari pada komposit dengan arah serat $[0,90]$ 12 layer.

Batas kecepatan balistik sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Tabel 4.19 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lama dari pada komposit arah serat $[0,90]$.



Gambar 4.26 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12layer 500m/s

Tabel 4.18 Batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 500m/s

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
$[\pm 45]$	500	461,02	38,98
$[0,90]$	500	463,072	36,928

Tabel 4.19 Waktu perforasi total komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 500m/s

Arah Serat	t_0 (s)	t_p (s)	t_{tot} (s)
$[\pm 45]$	1,97E-06	3,499E-05	3,293E-5
$[0,90]$	1,97E-06	2,898E-05	2,7E-5

Pada Gambar 4.2 sampai 4.4 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer pada waktu yang sama, yaitu 2,1E-5s, 2,1E-4s dan 2,6E-4s.

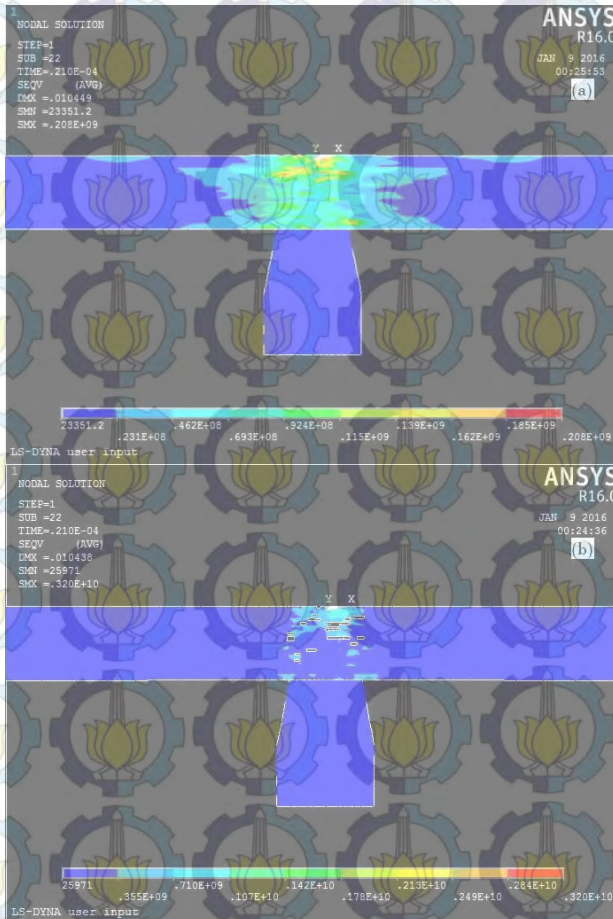
Pada waktu 2,1E-5s (lihat Gambar 4.27) komposit arah serat $[\pm 45]$ baru mengalami tegangan Von-Mises maksimum 0,208 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat $[0,90]$ sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar 0,320 GPa. Hal ini menyebabkan komposit arah serat $[0,90]$ akan mengalami kerusakan yang lebih cepat.

Berbeda dengan waktu 2,1E-5s, pada waktu 1,2E-5s (Gambar 4.28) tegangan maksimum Von-Mises pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih kecil, yaitu 2,49 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 2,92 GPa seperti pada Gambar 4.28. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lambat dari pada komposit arah serat $[0,90]$. Dapat dibuktikan pada Gambar, untuk komposit arah serat $[0,90]$ telah mengalami kerusakan lebih dahulu.

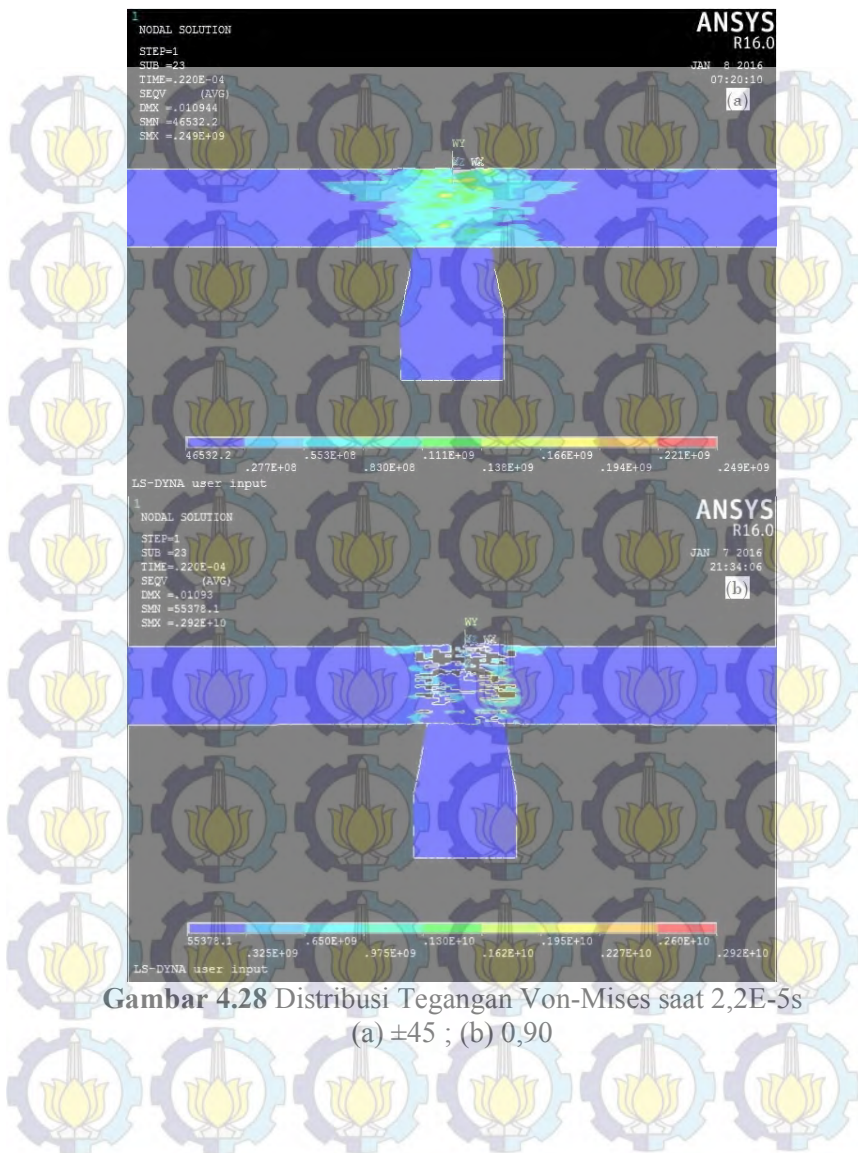
Pada waktu 2,2E-4s tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu 1,34 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 1,33 GPa. Hal ini terjadi karena

komposit arah serat $[\pm 45]$ baru mengalami kerusakan, sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ sudah mengalami kerusakan sepenuhnya (lihat Gambar 4.29).

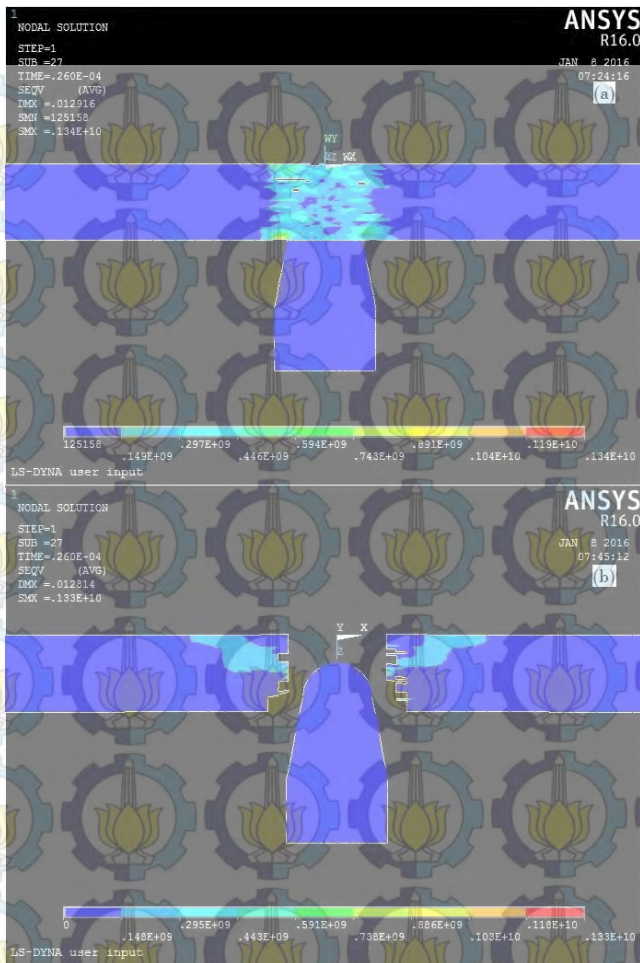
Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh pada banyaknya energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit seperti Gambar 4.30.



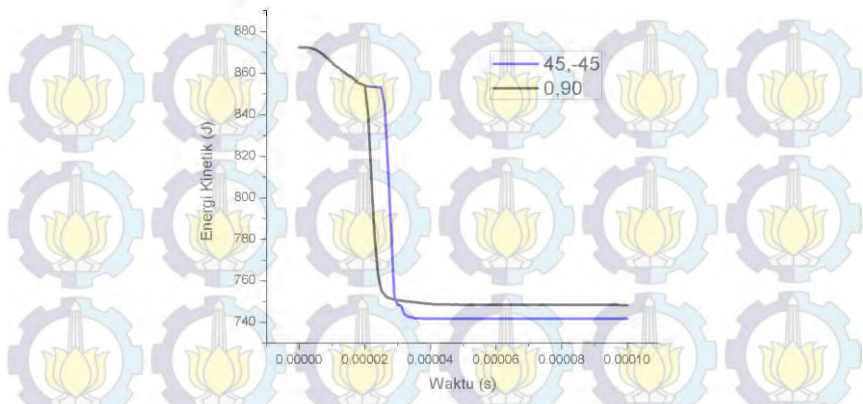
Gambar 4.27 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 2,1E-5s
 (a) ± 45 ; (b) 0,90



Gambar 4.28 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 2,2E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.29 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 2,6E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.30 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 500m/s

Alur penurunan grafik pada Gambar 4.30 menunjukkan komposit sedang menyerap energi kinetik proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan komposit sudah tidak dapat menampung energi kinetik proyektil.

Gambar 4.30 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ 500m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 130,7374J, Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ 500m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 124,1195J.

Tabel 4.20 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[90,0]$ 12 layer 500m/s

Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
$[\pm 45]$	872,5	741,7626	130,7374
$[0,90]$	872,5	748,3805	124,1195

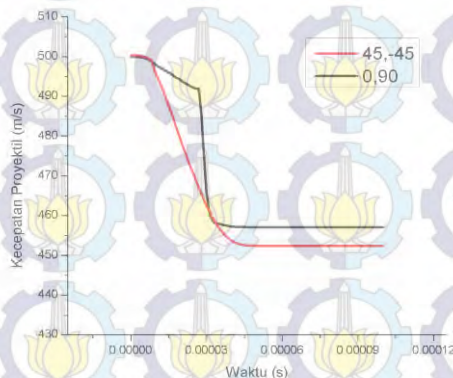
Tabel 4.20 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ 500m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 5,06% dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

4.2.2.3 Komposit 16 Layer $[\pm 45]$ dan $[0,90]$

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 500 m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan impak Gambar 4.31. Alur penurunan grafik pada Gambar menunjukkan komposit sedang mengalami perforasi oleh proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan proyektil telah selesai melakukan perforasi.

Gambar 4.31 memperlihatkan komposit arah serat $[\pm 45]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 500 m/s hingga menjadi 452,077 m/s. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 500 m/s menjadi 457,026 m/s. Dari Gambar 4.31 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer. Tabel 4.21 menunjukkan komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 16 layer untuk kecepatan awal 500 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 10,33% dari pada komposit dengan arah serat $[0,90]$ 16 layer.

Batas kecepatan balistik sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Tabel 4.22 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lama dari pada komposit arah serat $[0,90]$.



Gambar 4.31 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500 m/s

Tabel 4.21 Batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 500m/s

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
$[\pm 45]$	500	452,077	47,923
$[0,90]$	500	457,026	42,974

Tabel 4.22 Waktu perforasi total komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 500m/s

Arah Serat	t_0 (s)	t_p (s)	t_{tot} (s)
$[\pm 45]$	1,97E-6	4,1E-05	3,9E-5
$[0,90]$	1,97E-6	3,498E-05	3,3E-5

Pada Gambar 4.32 sampai 4.34 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer pada waktu yang sama, yaitu 0,4E-5s, 0,8E-5s dan 1,2E-5s.

Pada waktu 0,4E-5s (lihat Gambar 4.32) komposit arah serat $[\pm 45]$ baru mengalami tegangan Von-Mises maksimum 6,26 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat $[0,90]$ sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar 5,45 GPa. Hal ini juga menunjukkan bahwa untuk merusak komposit arah serat $[\pm 45]$ memerlukan tegangan Von-Mises yang lebih tinggi.

Sama dengan waktu 0,4E-5s, pada waktu 0,8E-5s komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami tegangan Von-Mises maksimum 8,05 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat $[0,90]$ mengalami tegangan Von-Mises sebesar 6,05 GPa (Gambar 4.33). Hal ini juga menunjukkan bahwa untuk merusak komposit arah serat $[\pm 45]$ memerlukan tegangan Von-Mises yang lebih tinggi.

Pada waktu 1,2E-5s hal serupa juga terjadi (Gambar 4.34), yaitu tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu 4,38 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 1,45 GPa. Hal ini memperlihatkan bahwa dengan kerusakan yang hampir sama komposit arah serat $[\pm 45]$ harus

dikenai tegangan Von-Mises yang lebih besar dibanding komposit arah serat $[0,90]$ agar memiliki kerusakan yang mirip.

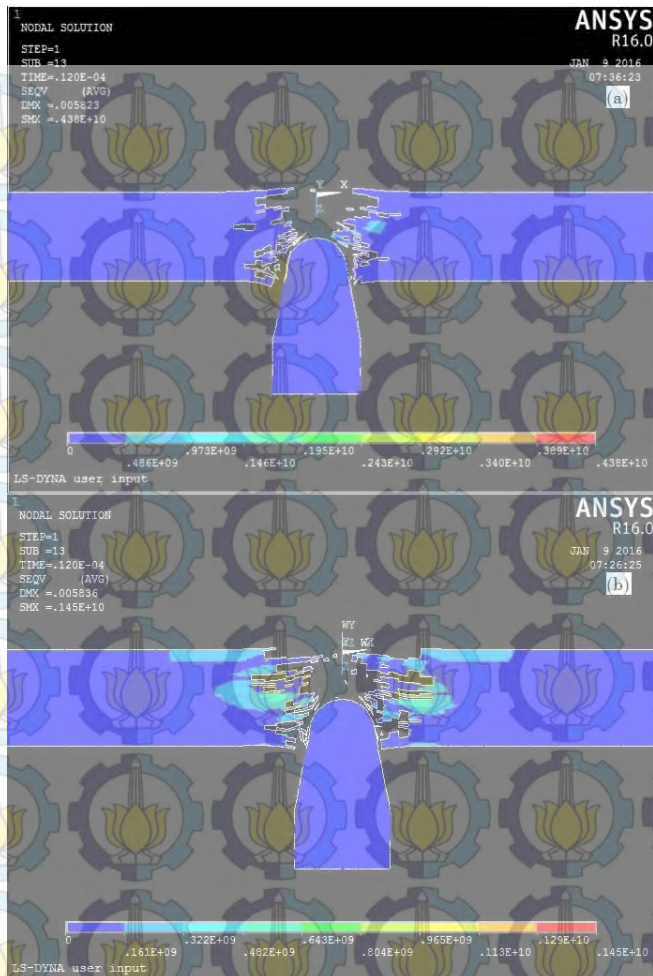
Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh pada banyaknya energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit seperti Gambar 4.35.



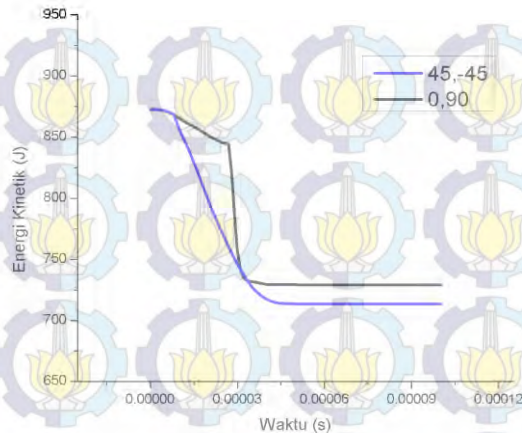
Gambar 4.32 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,4E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.33 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,8E-5s
(a) ± 45 ; (b) 0,90



Gambar 4.34 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 1,2E-5s
 (a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.35 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0, 90]$ 16 layer 500m/s

Alur penurunan grafik pada Gambar 4.35 menunjukkan komposit sedang menyerap energi kinetik proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan komposit sudah tidak dapat menampung energi kinetik proyektil.

Gambar 4.35 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ 500m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 159,2361J, Sedangkan komposit arah serat $[0, 90]$ 500m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 143,5341J.

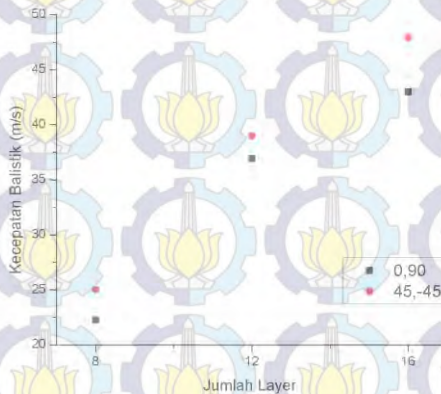
Tabel 4.23 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[90, 0]$ 16 layer 500m/s

Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
$[\pm 45]$	872,5	713,2639	159,2361
$[0, 90]$	872,5	728,9659	143,5341

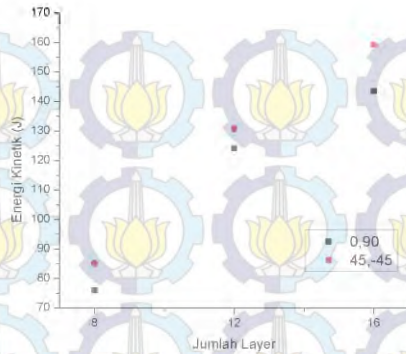
Tabel 4.23 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[0,90]$ 500m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 9,86% dari pada komposit arah serat $[\pm 45]$.

4.2.2.4. Perbandingan Hasil Pemodelan Komposit 8, 12 dan 16 Layer kecepatan 500m/s

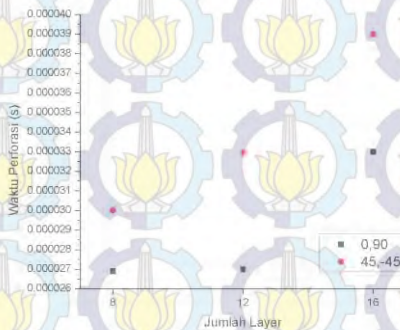
Setelah membahas satu-persatu hasil pemodelan baik pada komposit arah serat $[\pm 45]$ maupun $[0,90]$ dengan jumlah layer 8, 12 dan 16, dilakukan perbandingan hasil pemodelan dari komposit tersebut. Pada Gambar 4.36 sampai 4.38 disajikan perbandingan batas kecepatan balistik, energi kinetik proyektil terserap dan waktu perforasi pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$.



Gambar 4.36 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500m/s



Gambar 4.37 Perbandingan energi kinetik proyektil yang terserap komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500m/s

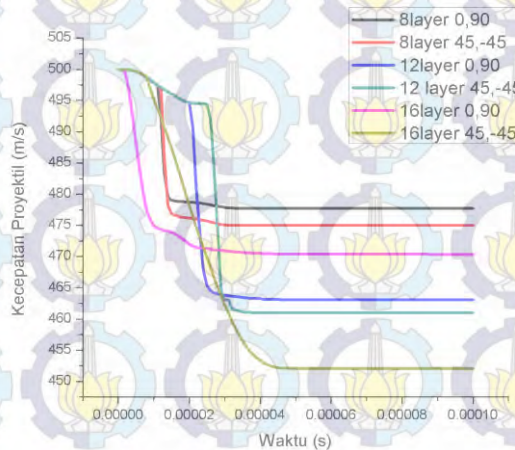


Gambar 4.38 Perbandingan waktu perforasi proyektil pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 500m/s

Gambar 4.36 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ memiliki batas kecepatan balistik secara keseluruhan lebih unggul 8,71% dari pada komposit arah serat $[0,90]$. Gambar 4.37 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih banyak 8,39% menyerap energi kinetik proyektil dari pada komposit arah serat $[0,90]$. Namun pada Gambar 4.38 menunjukkan bahwa komposit arah

serat $[0,90]$ memiliki waktu perforasi 14,7% lebih lama dari pada komposit arah serat $[\pm 45]$.

Pada Gambar 4.39 disajikan perbandingan kecepatan proyektil selama perforasi. Terlihat bahwa komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 16 layer memiliki kemampuan paling unggul dalam menurunkan kecepatan proyektil, yaitu hingga 47,923m/s dan komposit dengan arah serat $[0,90]$ 8 layer memiliki kemampuan terendah dalam menurunkan kecepatan proyektil, yaitu hanya sampai 22,267m/s.

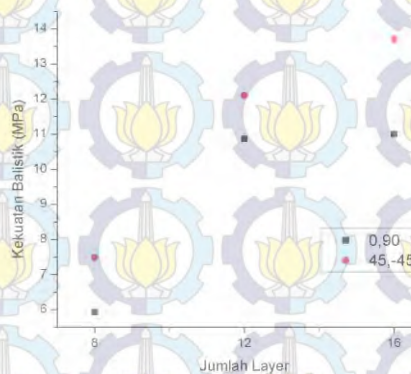


Gambar 4.39 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 500m/s

Kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ ditentukan menggunakan persamaan 2.34. Pada persamaan tersebut yang digunakan sebagai perhitungan adalah batas kecepatan balistik. Sehingga diperoleh kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ pada Tabel 4.24. Untuk lebih memperjelas perbedaan kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$, disajikan grafik pada Gambar 4.20.

Tabel 4.24 Kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 500m/s

Jml Layer	Arah Serat	Kekuatan Balistik (MPa)	Arah Serat	Kekuatan Balistik (MPa)
8	[± 45]	7,48	[0,90]	5,93
12		12,10		10,87
16		13,70		11,00



Gambar 4.40 Kekuatan balistik komposit arah serat [± 45] dan [0,90] 500m/s

Gambar 4.40 menunjukkan komposit arah serat [± 45] memiliki kekuatan balistik lebih unggul 16,46% dari pada komposit arah serat [0,90].

4.2.3. Kecepatan 800m/s

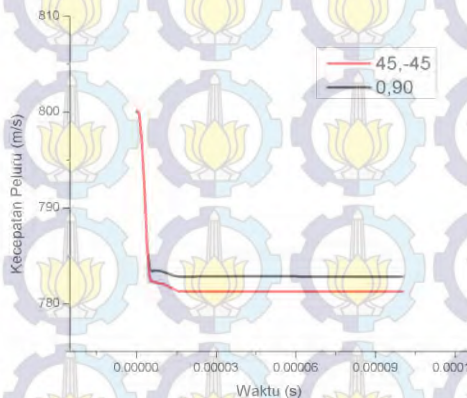
4.2.3.1 Komposit 8 Layer [± 45] dan [0,90]

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat [± 45] dan [0,90] 8 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 800m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan dampak Gambar 4.41. Alur penurunan grafik pada Gambar menunjukkan komposit sedang mengalami perforasi oleh proyektil. Sedangkan grafik

dengan alur konstan menunjukkan proyektil telah selesai melakukan perforasi.

Gambar 4.41 memperlihatkan komposit arah serat $[\pm 45]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 800 m/s hingga menjadi 781,127 m/s. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 800 m/s menjadi 782,829 m/s. Dari Gambar 4.41 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer. Tabel 4.25 menunjukkan komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 8 layer untuk kecepatan awal 800 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 13,596% dari pada komposit dengan arah serat $[0,90]$ 8 layer.

Batas kecepatan balistik sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Tabel 4.26 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lama dari pada komposit arah serat $[0,90]$.



Gambar 4.41 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s

Tabel 4.25 Batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer 800m/s

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
------------	-------------	-------------	-------------

[±45]	800	781,127	19,873
[0,90]	800	782,829	17,171

Tabel 4.26 Waktu perforasi total komposit arah serat [±45] dan [0,90] 8 layer kecepatan 800m/s

Arah Serat	t_0	t_p	t_{tot}
[±45]	0,997E-6	1,399E-05	1,299E-5
[0,90]	0,997E-6	1,19E-05	1,09E-5

Pada Gambar 4.42 sampai 4.44 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat [±45] dan [0,90] 8 layer pada waktu yang sama, yaitu 0,2E-5s, 0,4E-5s dan 0,6E-5s.

Pada waktu 0,2E-5s (lihat Gambar 4.42) komposit arah serat [±45] baru mengalami tegangan Von-Mises maksimum 6,98 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat [0,90] sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar 7,26 GPa. Hal ini menyebabkan komposit arah serat [0,90] akan mengalami kerusakan yang lebih cepat.

Berbeda dengan waktu 0,4E-5s, pada waktu 0,14E-4s komposit arah serat [±45] mengalami tegangan Von-Mises maksimum 7,88 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat [0,90] sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar 7,8 GPa (Gambar 4.43). Hal ini juga menunjukkan bahwa untuk merusak komposit arah serat [±45] memerlukan tegangan Von-Mises yang lebih tinggi.

Pada waktu 0,6E-5s hal serupa juga terjadi, yaitu tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat [±45] lebih besar, yaitu 4,97 GPa dari pada komposit arah serat [0,90], yaitu 3,12 GPa. Hal ini terjadi karena komposit arah serat [±45] masih mengalami perforasi. Sedangkan komposit arah serat [0,90] sudah hampir selesai mengalami perforasi (lihat Gambar 4.44).



Gambar 4.42 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,2E-5s
 (a) ± 45 ; (b) 0,90

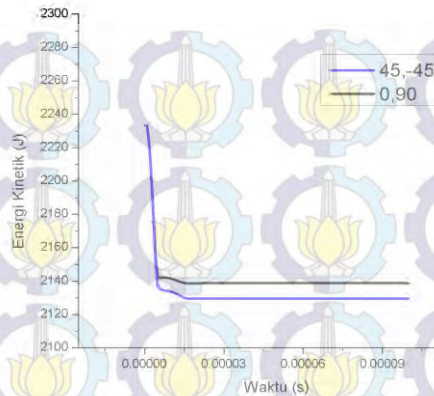


Gambar 4.43 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,4E-5s
 (a) ± 45 ; (b) 0,90



Gambar 4.44 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,6E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$

Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh pada banyaknya energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit seperti Gambar 4.45.



Gambar 4.45 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit[± 45] dan [0,90] 8 layer 800m/s

Alur penurunan grafik pada Gambar 4.45 menunjukkan komposit sedang menyerap energi kinetik proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan komposit sudah tidak dapat menampung energi kinetik proyektil.

Gambar 4.45 menunjukkan komposit arah serat [± 45] 800m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 104,144J. Sedangkan komposit arah serat [0,90] 800m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 94,854J.

Tabel 4.27 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat [± 45] dan [90,0] 8 layer

Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
[± 45]	2233,6	2129,456	104,144
[0,90]	2233,6	2138,746	94,854

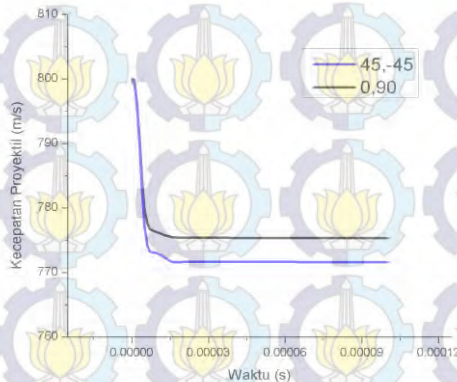
Tabel 4.27 menunjukkan bahwa komposit arah serat [± 45] 800m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 8,92% dari pada komposit arah serat [0,90].

4.2.3.2 Komposit 12 Layer $[\pm 45]$ dan $[0,90]$

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 800m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan impak Gambar 4.46. Alur penurunan grafik pada Gambar 4.46 menunjukkan komposit sedang mengalami perforasi oleh proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan proyektil telah selesai melakukan perforasi.

Gambar 4.46 memperlihatkan komposit arah serat $[\pm 45]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 800 m/s hingga menjadi 772,075 m/s. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 800 m/s menjadi 775,335 m/s. Dari Gambar 4.46 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer. Tabel 4.28 menunjukkan komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 12 layer untuk kecepatan awal 800 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 11,67% dari pada komposit dengan arah serat $[0,90]$ 12 layer.

Batas kecepatan balistik sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Tabel 4.29 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lama dari pada komposit arah serat $[0,90]$.



Gambar 4.46 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 800m/s

Tabel 4.28 Batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 800m/s

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
$[\pm 45]$	800	772,075	27,925
$[0,90]$	800	775,33	24,67

Tabel 4.29 Waktu perforasi total komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer kecepatan 800m/s

Arah Serat	t_0 (s)	t_p (s)	t_{tot} (s)
$[\pm 45]$	0,9912E-06	1,499E-05	1,399E-5
$[0,90]$	0,9912E-06	1,299E-05	1,1E-5

Pada Gambar 4.47 sampai 4.49 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer pada waktu yang sama, yaitu 0,3E-5s, 0,5E-5s dan 0,8E-4s.

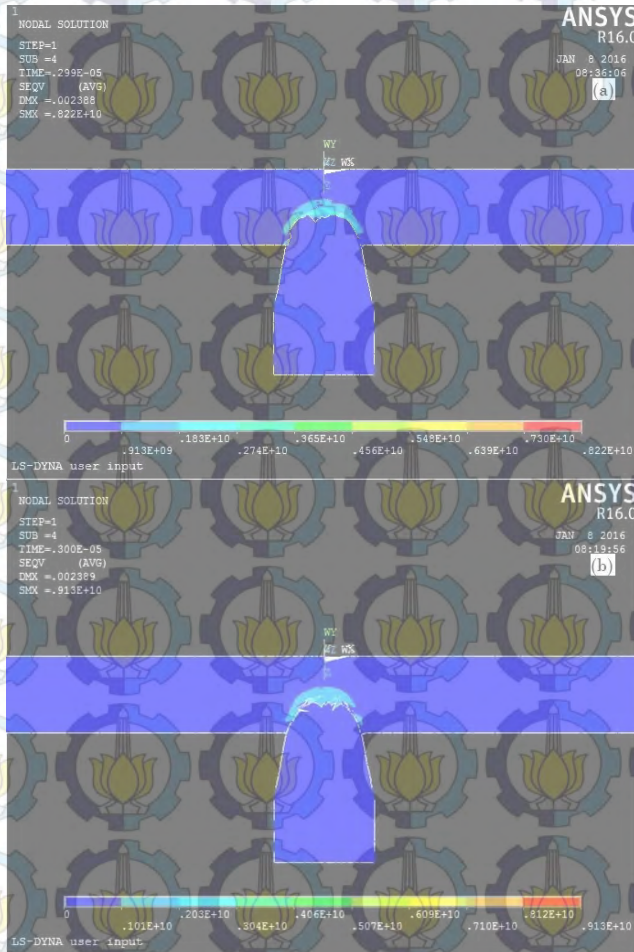
Pada waktu 0,3E-5s (lihat Gambar 4.47) komposit arah serat $[\pm 45]$ baru mengalami tegangan Von-Mises maksimum 8,22 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat $[0,90]$ sudah mengalami tegangan Von-Mises sebesar 9,13 GPa. Hal ini menyebabkan komposit arah serat $[0,90]$ akan mengalami kerusakan yang lebih cepat.

Berbeda dengan waktu 0,3E-5s, pada waktu 0,5E-5s (Gambar 4.48) tegangan maksimum Von-Mises pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih kecil, yaitu 6,73 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 7,05 GPa seperti pada Gambar 4.48. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lambat dari pada komposit arah serat $[0,90]$. Dapat dibuktikan pada Gambar, untuk komposit arah serat $[0,90]$ telah mengalami kerusakan lebih parah.

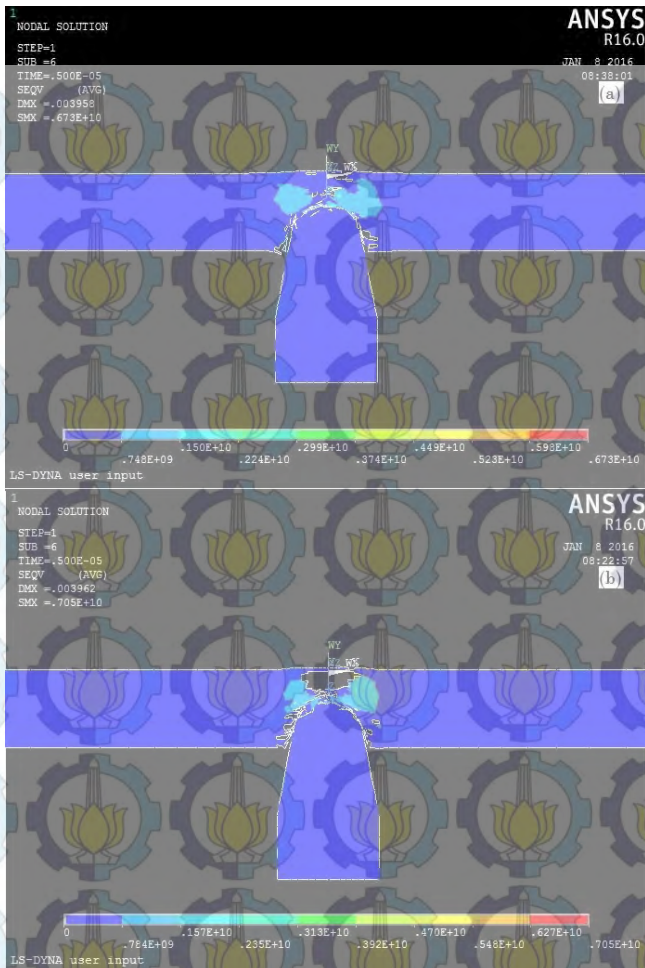
Pada waktu 0,8E-4s hal serupa juga terjadi, yaitu tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu 4,04 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 1,56 GPa. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ masih

mengalami perforasi. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ sudah hampir selesai mengalami perforasi (lihat Gambar 4.49).

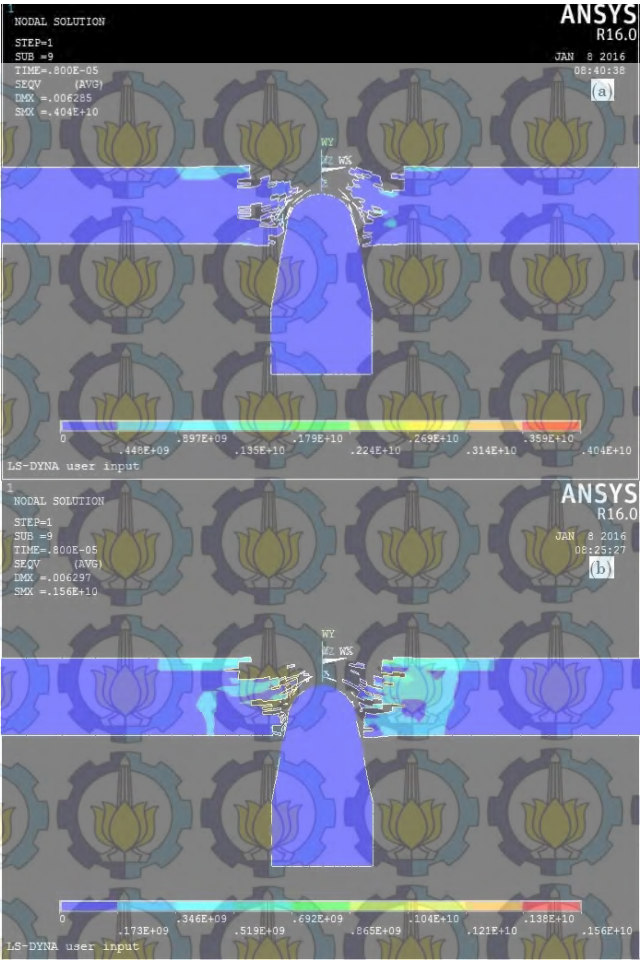
Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh pada banyaknya energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit seperti Gambar 4.50.



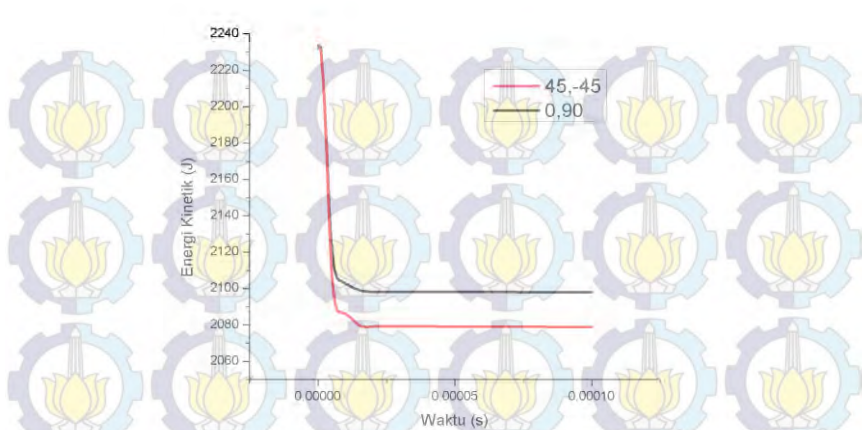
Gambar 4.47 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,3E-5s$
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.48 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,5E-5s
(a) ± 45 ; (b) 0,90



Gambar 4.49 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,8E-5s
(a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90^\circ$



Gambar 4.50 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 12 layer 800m/s

Alur penurunan grafik pada Gambar 4.50 menunjukkan komposit sedang menyerap energi kinetik proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan komposit sudah tidak dapat menampung energi kinetik proyektil.

Gambar 4.50 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ 800m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 153,21J. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ 800m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 135,62J.

Tabel 4.30 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[90,0]$ 12 layer

Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
$[\pm 45]$	2233,6	2080,39	153,21
$[0,90]$	2233,6	2097,98	135,62

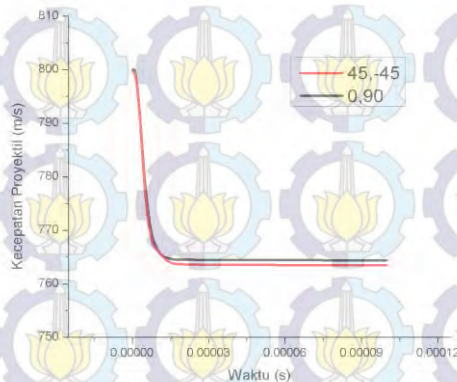
Tabel 4.30 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ 800m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 11,48% dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

4.2.3.3 Komposit 16 Layer $[\pm 45]$ dan $[0,90]$

Dari pemodelan yang dilakukan pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer yang ditumbuk oleh peluru berkecepatan 800 m/s diperoleh hasil pada grafik kecepatan impak Gambar 4.51. Alur penurunan grafik pada Gambar menunjukkan komposit sedang mengalami perforasi oleh proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan proyektil telah selesai melakukan perforasi.

Gambar 4.51 memperlihatkan komposit arah serat $[\pm 45]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil lebih besar, yaitu dari 800 m/s hingga menjadi 763,907 m/s. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ dapat menurunkan kecepatan proyektil dari 800 m/s menjadi 764,379 m/s. Dari Gambar 4.51 dapat ditentukan batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer. Tabel 4.31 menunjukkan komposit dengan arah serat $[0,90]$ 16 layer untuk kecepatan awal 800 m/s memiliki batas kecepatan balistik sebesar 1,3% dari pada komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 16 layer.

Batas kecepatan balistik sangat dipengaruhi oleh lama waktu perforasi proyektil pada komposit. Tabel 4.32 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami perforasi lebih lama dari pada komposit arah serat $[0,90]$.



Gambar 4.51 Grafik kecepatan proyektil komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 800 m/s

Tabel 4.31 Batas kecepatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 800m/s

Arah Serat	V_0 (m/s)	V_p (m/s)	V_b (m/s)
$[\pm 45]$	800	763,907	36,093
$[0,90]$	800	764,379	35,621

Tabel 4.32 Waktu perforasi total komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer kecepatan 800m/s

Arah Serat	t_0 (s)	t_p (s)	t_{tot} (s)
$[\pm 45]$	0,988E-6	2,499E-05	2,4E-5
$[0,90]$	0,988E-6	1,399E-05	1,231E-5

Pada Gambar 4.52 sampai 4.54 disajikan tegangan Von-Mises komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8 layer pada waktu yang sama, yaitu 0,4E-5s, 0,6E-5s dan 0,7E-4s.

Pada waktu 0,4E-5s (lihat Gambar 4.52) komposit arah serat $[\pm 45]$ mengalami tegangan Von-Mises maksimum 9,47 GPa. Sedangkan pada komposit arah serat $[0,90]$ mengalami tegangan Von-Mises sebesar 8,24 GPa. Hal ini menunjukkan bahwa pada waktu yang sama komposit arah serat $[\pm 45]$ menerima tegangan Von-Mises yang lebih besar.

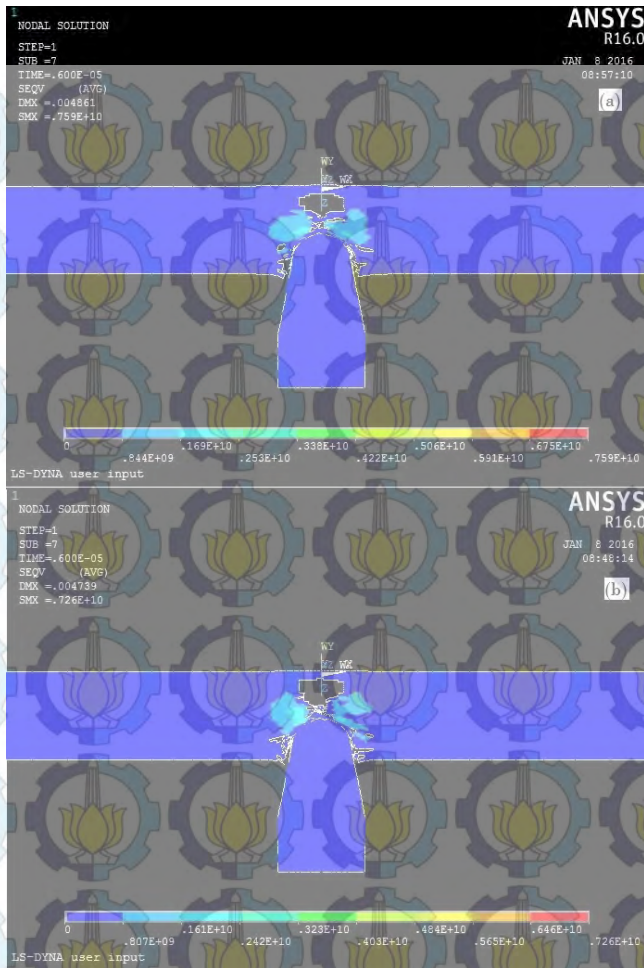
Berbeda dengan waktu 0,6E-5s, pada waktu 0,14E-4s tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu 7,59 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 7,26 GPa. Hal ini menunjukkan bahwa untuk membuat kerusakan yang sama komposit arah serat $[\pm 45]$ harus diberikan tegangan Von-Mises yang lebih besar dibanding komposit arah serat $[0,90]$ (lihat Gambar 4.53).

Pada waktu 0,7E-5s hal serupa juga terjadi, yaitu tegangan Von-Mises maksimum pada komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih besar, yaitu 6,88 GPa dari pada komposit arah serat $[0,90]$, yaitu 5,78 GPa. Hal ini terjadi karena komposit arah serat $[\pm 45]$ masih mengalami perforasi. Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ sudah hampir selesai mengalami perforasi (lihat Gambar 4.54).

Selain berpengaruh pada tegangan, lama waktu perforasi juga berpengaruh pada banyaknya energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit seperti Gambar 4.55.

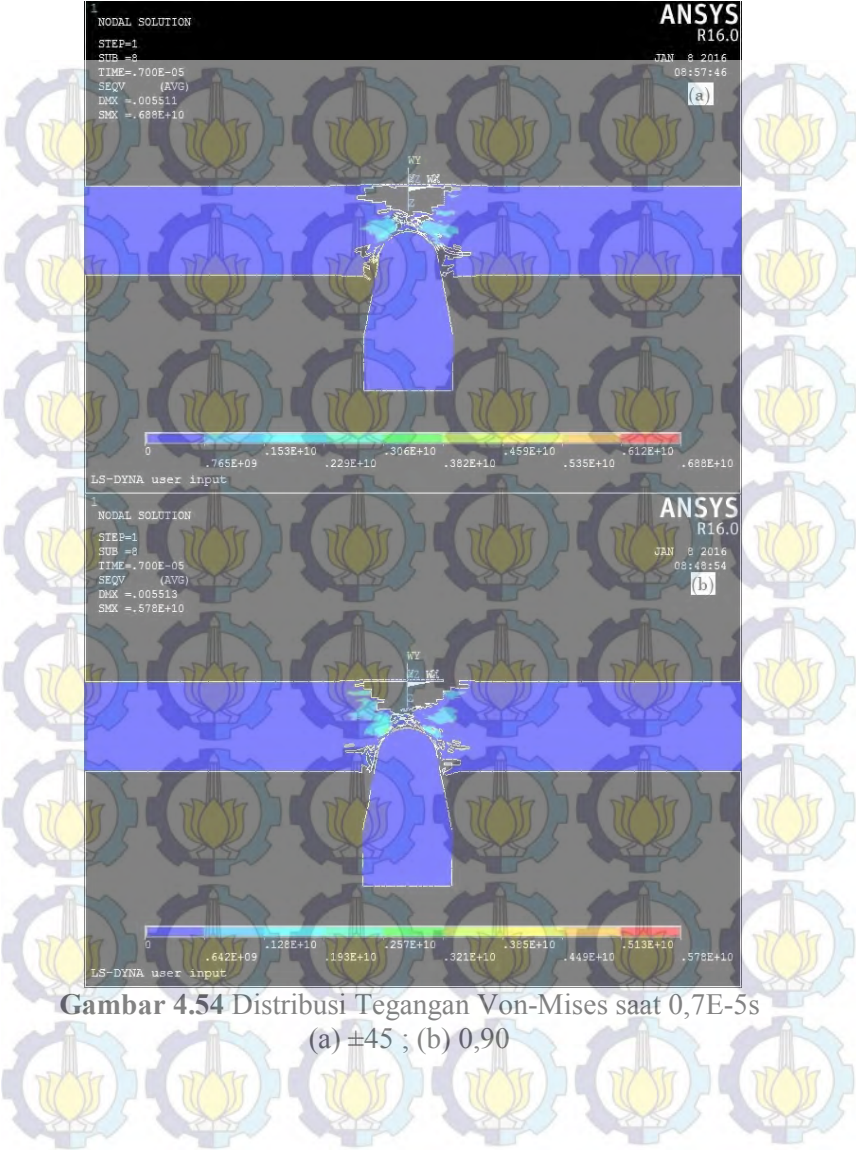


Gambar 4.52 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,4E-5s$
(a) ± 45 ; (b) $0,90$

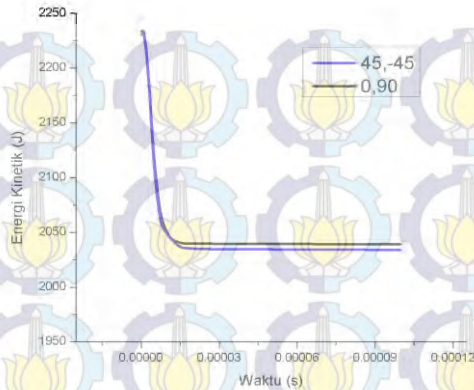


Gambar 4.53 Distribusi Tegangan Von-Mises saat 0,6E-5s

(a) ± 45 ; (b) 0,90



Gambar 4.54 Distribusi Tegangan Von-Mises saat $0,7E-5s$ (a) $\pm 45^\circ$; (b) $0,90$



Gambar 4.55 Energi kinetik proyektil yang terserap komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 16 layer 800m/s

Alur penurunan grafik pada Gambar 4.55 menunjukkan komposit sedang menyerap energi kinetik proyektil. Sedangkan grafik dengan alur konstan menunjukkan komposit sudah tidak dapat menampung energi kinetik proyektil.

Gambar 4.55 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ 800m/s, dapat menurunkan energi kinetik proyektil sebesar 196,997J, Sedangkan komposit arah serat $[0,90]$ 800m/s dapat menurunkan energi kinetik proyektil hingga sebesar 194,479J.

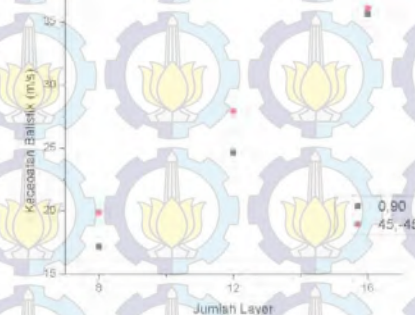
Tabel 4.33 Energi kinetik proyektil yang terserap oleh komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[90,0]$ 16 layer 800m/s

Arah Serat	EK ₀ (J)	EK _p (J)	EK (J)
$[\pm 45]$	2233,6	2036,603	196,997
$[0,90]$	2233,6	2039,121	194,479

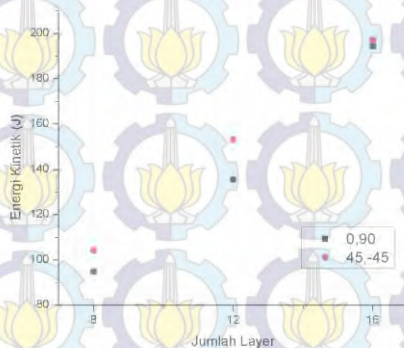
Tabel 4.33 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ 800m/s, dapat menyerap energi kinetik proyektil lebih besar 1,3% dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

4.2.3.4. Perbandingan Hasil Pemodelan Komposit 8, 12 dan 16 Layer kecepatan 800m/s

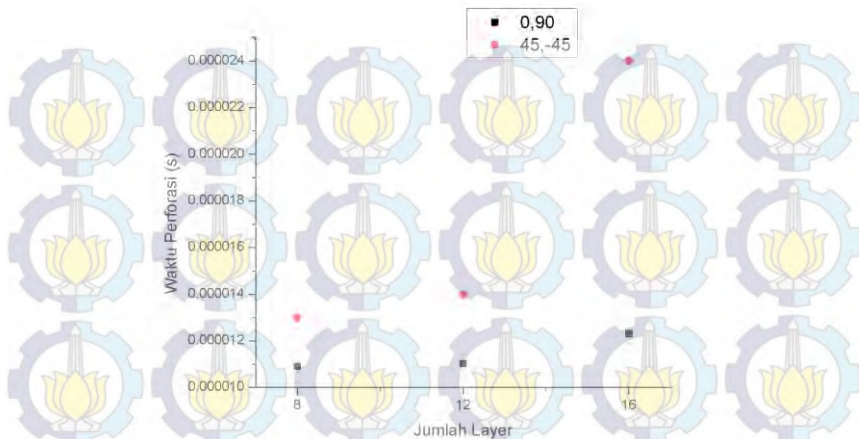
Setelah membahas satu-persatu hasil pemodelan baik pada komposit arah serat $[\pm 45]$ maupun $[0,90]$ dengan jumlah layer 8, 12 dan 16, dilakukan perbandingan hasil pemodelan dari komposit tersebut. Pada Gambar 4.56 sampai 4.58 disajikan perbandingan batas kecepatan balistik, energi kinetik proyektil terserap dan waktu perforasi pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$.



Gambar 4.56 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s



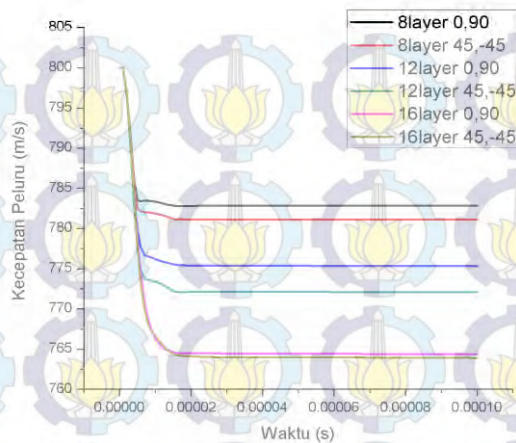
Gambar 4.57 Perbandingan energi kinetik proyektil yang terserap komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s



Gambar 4.58 Perbandingan waktu perforasi proyektil pada komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s

Gambar 4.56 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ memiliki batas kecepatan balistik secara keseluruhan lebih unggul 7,67% dari pada komposit arah serat $[0,90]$. Gambar 4.57 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ lebih banyak 6,47% menyerap energi kinetik proyektil dari pada komposit arah serat $[0,90]$. Pada Gambar 4.58 menunjukkan bahwa komposit arah serat $[\pm 45]$ memiliki waktu perforasi 32,85% lebih lama dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

Pada Gambar 4.59 disajikan perbandingan kecepatan proyektil selama perforasi. Terlihat bahwa komposit dengan arah serat $[\pm 45]$ 16 layer memiliki kemampuan paling unggul dalam menurunkan kecepatan proyektil, yaitu hingga 36,093m/s dan komposit dengan arah serat $[0,90]$ 8 layer memiliki kemampuan terendah dalam menurunkan kecepatan proyektil, yaitu hanya sampai 17,171m/s.

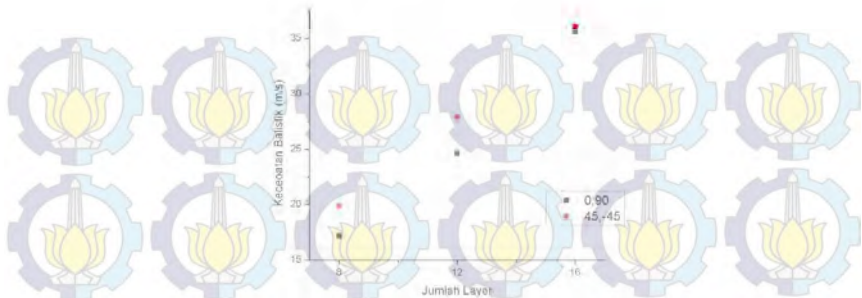


Gambar 4.59 Perbandingan batas kecepatan balistik komposit $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 800m/s

Kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ ditentukan menggunakan persamaan 2.34. Pada persamaan tersebut yang digunakan sebagai perhitungan adalah batas kecepatan balistik. Sehingga diperoleh kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ pada Tabel 4.34. Untuk lebih memperjelas perbedaan kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$, disajikan grafik pada Gambar 4.20.

Tabel 4.34 Kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 8, 12 dan 16 layer 800m/s

Jml layer	Arah Serat	Kekuatan Balistik (MPa)	Arah Serat	Kekuatan Balistik (MPa)
8	$[\pm 45]$	4,70	$[0,90]$	3,53
12		6,20		4,85
16		7,80		7,60



Gambar 4.60 Kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ 800m/s

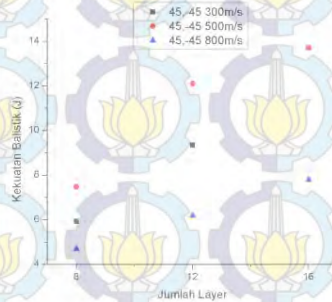
Gambar 4.60 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ memiliki kekuatan balistik lebih unggul 14,55% dari pada komposit arah serat $[0,90]$.

Komposit arah serat $[\pm 45]$ memiliki kekuatan balistik yang lebih baik dibanding komposit arah serat $[0,90]$ dikarenakan tegangan yang diterima menyebar lebih merata ke bagian komposit yang lain. Sedangkan pada komposit arah serat $[0,90]$ tegangan terlokalisir sehingga tegangan yang terjadi lebih besar di satu titik. Hal ini mengakibatkan tegangan awal yang diterima komposit arah serat $[0,90]$ menjadi lebih besar dan mampu menghancurkan komposit. Untuk komposit arah serat $[\pm 45]$ tegangan awal yang diterima lebih sedikit karena komposit mampu meneruskan tegangan ke sekitarnya dengan lebih baik. Hal ini membuat waktu perforasi menjadi lebih lama sehingga saat keluar dari komposit arah serat $[\pm 45]$ peluru memiliki kecepatan yang lebih rendah dibanding arah serat $[0,90]$. Hal ini berakibat kekuatan balistik arah serat $[\pm 45]$ lebih tinggi karena peningkatan kekuatan balistik sebanding dengan kecepatan balistik.

4.2.3.5. Perbandingan Kekuatan Balistik Komposit 8, 12 dan 16 Layer kecepatan 300m/s, 500m/s dan 800m/s

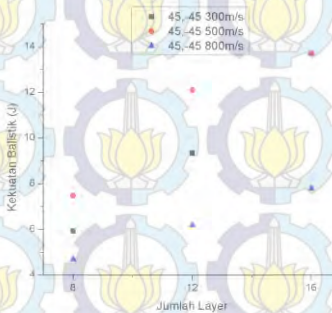
Setelah membahas satu-persatu hasil kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ & $[0,90]$ pada kecepatan 300m/s, 500m/s

& 800m/s, dilakukan perbandingan hasil pemodelan dari komposit tersebut. Pada Gambar 4.61 & 4.62 disajikan perbandingan kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ dan $[0,90]$ pada masing-masing kecepatan.



Gambar 4.61 Kekuatan balistik komposit arah serat $[0,90]$ kecepatan 300m/s, 500m/s & 800m/s

Gambar 4.61 menunjukkan komposit arah serat $[0,90]$ kecepatan 500m/s memiliki kekuatan balistik lebih unggul 19% & 42.5% daripada komposit arah serat $[0,90]$ kecepatan 300m/s & 800m/s.



Gambar 4.62 Kekuatan balistik komposit arah serat $[\pm 45]$ kecepatan 300m/s, 500m/s & 800m/s

Gambar 4.62 menunjukkan komposit arah serat $[\pm 45]$ kecepatan 500m/s memiliki kekuatan balistik lebih unggul 12.92% & 43.81% daripada komposit arah serat $[\pm 45]$ kecepatan 300m/s & 800m/s.

4.3. Validasi

Perhitungan validasi menggunakan model balistik Wen pada persamaan 2.32. Kelengkapan data pendukung perhitungan validasi disajikan pada Tabel 4.35.

Tabel 4.35 Data pendukung validasi

Arah Serat	Jml. Layer	T (mm)	σ_e (MPa)	D (mm)	G (g)
[±45]	8	4,56	300	4,515	6,98
	12	6,84			
	16	9,12			
[0,90]	8	4,56	229		
	12	6,84			
	16	9,12			

Dimana V_b adalah batas kecepatan balistik, D adalah diameter proyektil, T adalah ketebalan komposit, σ_e adalah tegangan ekuivalen komposit dan G adalah massa proyektil.

Setelah melakukan perhitungan data pendukung dengan hasil pada Tabel 4.36. Dilakukan perhitungan batas kecepatan balistik untuk kecepatan 300m/s, 500m/s & 800m/s.

Tabel 4.36 Batas kecepatan balistik model Wen

Arah Serat	Jml. Layer	V_b (m/s)
[±45]	8	22.55022
	12	33.68738
	16	44.82399
[0,90]	8	19.70189
	12	29.43231
	16	39.16225

Hasil perhitungan batas kecepatan balistik disajikan pada Tabel 4.37, 4.38 & 4.39.

4.3.1 Validasi Kecepatan Projektil 300, 500 dan 800m/s

Setelah didapatkan hasil perhitungan dengan model wen pada Gambar 4.36 dilakukan perhitungan error relatif data hasil pemodelan dengan perhitungan model wen yang disajikan pada Tabel 4.37 sampai 4.39 untuk kecepatan peluru 300, 500 dan 800m/s. error relatif didapatkan dengan menghitung selisih V_b hasil pemodelan dengan V_b perhitungan model wen kemudian dibagi dengan V_b model Wen.

Tabel 4.37 Error relatif 300m/s

Arah Serat	Jml. Layer	V_M (m/s)	V_b (m/s)	Error Relatif (%)
[±45]	8	22.55022	22.264	-1.285573123
	12	33.68738	34.243	1.622579797
	16	44.82399	47.873	6.368955361
[0,90]	8	19.70189	20.531	4.038332278
	12	29.43231	32.598	9.711301307
	16	39.16225	38.798	-0.93883705

Tabel 4.37 menunjukkan error relatif tertinggi untuk kecepatan 300m/s terjadi adalah 9.711%. Syarat data hasil pemodelan dapat diterima adalah error yang terjadi tidak melebihi 10%. Sehingga simulasi bisa diterima.

Tabel 4.38 Error relatif 500m/s

Arah Serat	Jml. Layer	V_M (m/s)	V_b (m/s)	Error Relatif (%)
[±45]	8	22.55022	25.015	9.853208075
	12	33.68738	38.98	13.57778348
	16	44.82399	47.923	6.466644409
[0,90]	8	19.70189	22.267	11.51978264
	12	29.43231	36.928	20.29812067
	16	39.16225	42.974	8.869898078

Tabel 4.37 menunjukkan error relatif tertinggi untuk kecepatan 500m/s terjadi adalah 20,3%. Syarat data hasil pemodelan dapat diterima adalah error yang terjadi tidak melebihi 10%. Sehingga terdapat simulasi yang belum bisa diterima.

Tabel 4.39 Error relatif 800m/s

Arah Serat	Jml. Layer	V_M (m/s)	V_b (m/s)	Error Relatif (%)
[±45]	8	22.55022	19.873	-13.47164495
	12	33.68738	27.925	-20.63520143
	16	44.82399	36.093	-24.1902585
[0,90]	8	19.70189	17.171	-14.73932794
	12	29.43231	24.667	-19.31856326
	16	39.16225	35.621	-9.941467112

Tabel 4.39 menunjukkan error relatif tertinggi untuk kecepatan 800m/s terjadi adalah 24,19%. Syarat data hasil pemodelan dapat diterima adalah error yang terjadi tidak melebihi 10%. Sehingga terdapat beberapa simulasi yang belum bisa diterima.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan, dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Komposit E-glass/isophthalic polyester dengan arah serat $[\pm 45]$ memiliki kekuatan impak balistik lebih tinggi 22,32%, 16,46% & 14,55% dari pada komposit dengan arah serat $[0,90]$ untuk tiap kecepatan 300, 500 & 800m/s karena distribusi tegangan lebih merata dibandingkan komposit $[0,90]$ yang terjadi konsentrasi tegangan di area yang kecil.
2. Kekuatan impak balistik tertinggi komposit E-glass/isophthalic polyester arah serat $[\pm 45]$ adalah pada kecepatan 500m/s yang lebih besar 12.92% & 43.81% daripada kecepatan 300m/s & 800m/s sedangkan untuk arah serat $[0.90]$ kekuatan balistik kecepatan 500m/s lebih besar 19% & 42.5% daripada kecepatan 300m/s & 800m/s. Hal ini terjadi karena persebaran tegangan paling besar terjadi pada kecepatan 500m/s, hal ini membuat area yang menerima tegangan adalah yang paling luas sehingga pada kecepatan inilah yang paling tangguh dalam meredam laju peluru.
3. Proses validasi menggunakan model Wen dan menunjukkan nilai error pada komposit E-glass/isophthalic-polyester berkisar antara -0.94% sampai 24,2%.

5.2. Saran

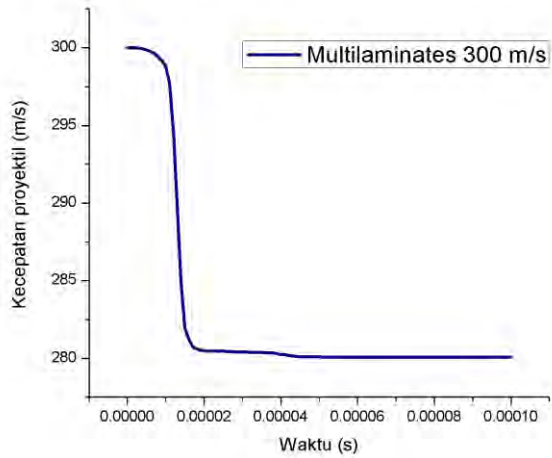
Untuk kesempurnaan tugas akhir yang akan datang disarankan :

1. Menggunakan variabel arah serat yang biasanya digunakan oleh produsen material anti peluru, sehingga kekuatan dari material anti peluru yang ada dipasaran dapat diketahui.

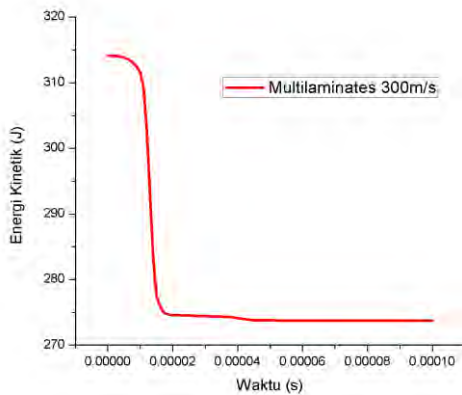
2. Sebaiknya dalam penelitian yang lebih lanjut ukuran elemen diperkecil sehingga hasil dapat lebih akurat.

LAMPIRAN

▪ Kecepatan 300m/s Multilaminates



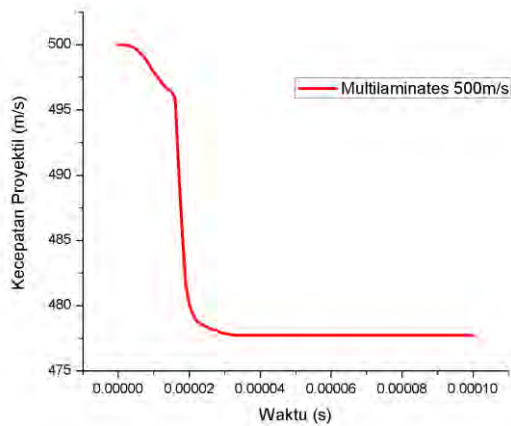
▪ EK 300m/s Multilaminates



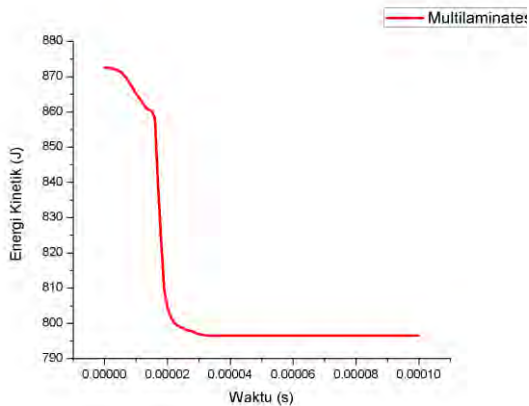
- **Perforasi 300m/s Multilaminates**

Arah Serat	t_0	t_p	t_{tot}
[0,90,45,-45/rep]	0.29E-05	0.32E-04	2,91E-5

- **Kekuatan Balistik= 4,75MPa**
- **Kecepatan 500m/s Multilaminates**



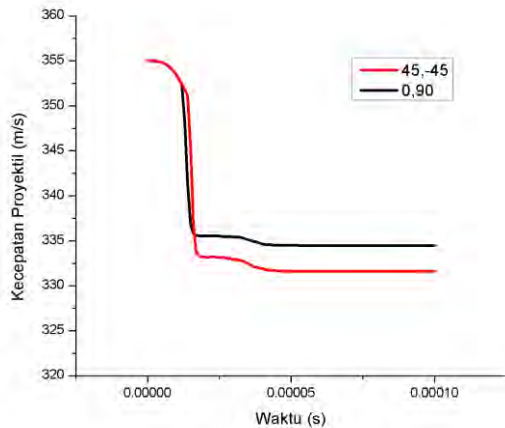
- **EK 500m/s Multilaminates**



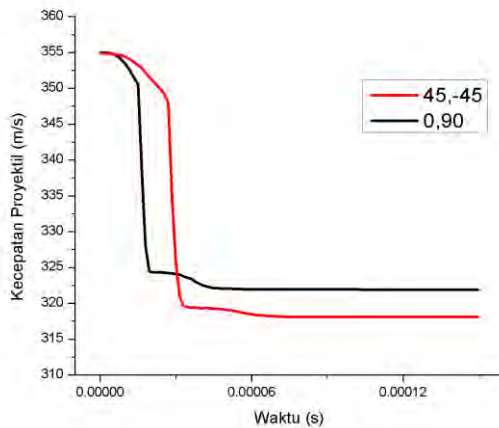
- **Perforasi 500m/s Multilaminates**

Arah Serat	t_0	t_p	t_{tot}
[0,90,45,-45/rep]	0.19E-05	0.29E-04	2,71E-5

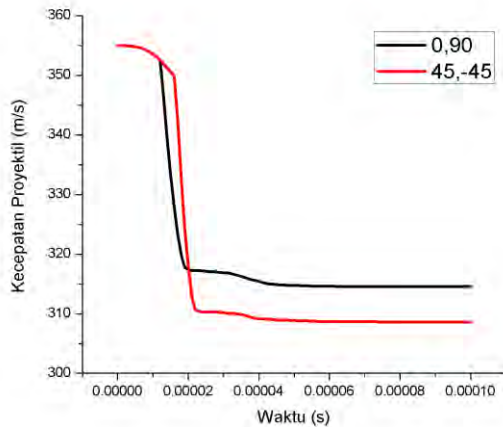
- **Kekuatan Balistik = 5,93MPa**
- **Kecepatan Balistik 355m/s 8layer**



- **Kecepatan Balistik 355m/s 12layer**



▪ Kecepatan Balistik 355m/s 16layer



▪ Command MAT_ADD_EROSION 0,90

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*mat_add_erosion
2,0,0,0,0.03341322,0.0243209,0,3
$ erosion of part 3 based on von Mises stress
0,0,0,0.048,0,0,0,0
$ erosion of part 3 based on max principal strain
$0,0,0,0,0,0,0,0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*mat_add_erosion
3,0,0,0,0.03493534,0.0281523,0,3
$ erosion of part 3 based on von Mises stress
0,0,0,0.048,0,0,0,0
$ erosion of part 3 based on max principal strain
$0,0,0,0,0,0,0,0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

```

▪ Command MAT_ADD_EROSION 45,-45

```

$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*mat_add_erosion
2,0,0,0,0.04656265,0.0336461,0,3
$ erosion of part 3 based on von Mises stress
0,0,0,0.048,0,0,0,0
$ erosion of part 3 based on max principal strain
$0,0,0,0,0,0,0,0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8
*mat_add_erosion
3,0,0,0,0.04656265,0.0336461,0,3
$ erosion of part 3 based on von Mises stress
0,0,0,0.048,0,0,0,0
$ erosion of part 3 based on max principal strain
$0,0,0,0,0,0,0,0
$-----1-----2-----3-----4-----5-----6-----7-----8

```


DAFTAR PUSTAKA

- Alallak, N. A., S.S., Sarhan, 2011, "*Jordan Journal of Physics*", Department of Engineering, Arab Community College, Amman, Jordan.
- Jenq, S.T., H.-S., Jing, Charles, Chung, 1994, "*Predicting The Ballistic Limit For Plain Woven Glass/Epoxy Composite Laminate*", Institute of Aeronautics and Astronautics, National Cheng Kung University, Tainan 701.
- Jones, R.M., 1975. "*Mechanics of Composite Materials*", McGraw-Hill, Inc., ISBN 0-07- 032790-4.
- Jover, N., Shafiq, M., Vaidya, U., 2013. "*Ballistic Impact Analysis of Balsa Core Sandwich Composites*", Composites: Part B 67 (2014) 160–169.
- Kaw, Autar K., 2006. "*Mechanics of Composite Materials Second Edition*", Taylor and Francis Group, ISBN 0-8493-1343-0.
- Liu, Weilan, Zhaofeng, Chen, Xingwang, Cheng, Yangwei, Wang, Adjei, Richard, Amankwa, Jiang, Xu, 2015, "*Design And Ballistic Penetration Of The Ceramic Composite Armor*", Composites Part B 84 (2016) 33-40.
- McWilliams, B, Yu, J., Pankow, M., Yen, C.F., 2014, "*Ballistic Impact Behavior Of Woven Ceramic Fabric Reinforced Metal Matrix Composites*", International Journal of Impact Engineering 86 (2015) 57-66.
- Nilakantan , Gaurav, Nutt, Steven., 2014. "*Effects of Fabric Target Shape and Size on The V50 Ballistic Impact Response of Soft Body Armor*", Composite Structures 116 (2014) 661–669.
- Panglevi, Rizal, 2014, "*Simulation Of Influence Of Fiber Direction To Ballistic Impact Strength Of E-Glass/Isophthalic Polyester Composite*" Jurnal Teknik Its Vol. 1, No. 1, (2015) 1 – 6

- Rahman, Muhammad, Mahesh, Hosur, Shaik, Zainuddin, Uday, Vaidya, Arefin, Tauhid, Ashok, Kumar, Jonathan, Trovillion, Shaik, Jeelani, 2012, "*Effects Of Amino-Functionalized Mwcnts On Ballistic Impact Performance Of E-Glass/Epoxy Composites Using A Spherical Projectile*", International Journal of Impact Engineering 57 (2013) 108e118.
- Reddy, P., Rama, Subba, T., Sreekantha, Reddy, V., Madhu, A.K., Gogia, K., Venkateswara, Rao, 2015, "*Behavior Of E-Glass Composite Laminates Under Ballistic Impact*", Materials and Design 84 (2015) 79–86.
- Sastry, Y.B., Sudhir, Budarapu, R., Pattabhi R, Krishna, Y., Devaraj, S., 2014, "*Studies On Ballistic Impact Of The Composite Panels*", Theoretical and Applied Fracture Mechanics 72 (2014) 2–12.
- Sevkat, Ercan, Benjamin Liaw, Feridun Delale , Basavaraju B. Raju, 2008, "*A Combined Experimental And Numerical Approach To Study Ballistic Impact Response Of S2-Glass Fiber/Toughened Epoxy Composite Beams*", Composites Science and Technology 69 (2009) 965–982.
- Sevkat, Ercan, Liaw, Benjamin, Delale, Feridun, Raju, B., Basavaraju, 2008. "*A Combined Experimental And Numerical Approach To Study Ballistic Impact Response Of S2-Glass Fiber/Toughened Epoxy Composite Beams*", Composites Science and Technology 69 (2009) 965–982.
- Sulistijono, 2012. "Mekanika Material Komposit", ITS Press, ISBN 9-786029-494129
- Wang, J., R., Callinan, 2014, "*Residual Strengths Of Composite Structures Subjected To Ballistic Impact*", Composite Structures 117 (2014) 423–432.
- Wang, Ying, Xiaogang, Chen, Robert, Young, Ian, Kinloch, 2015, "*Finite Element Analysis Of Effect Of Inter-Yarn Friction On Ballistic Impact Response Of Woven Fabrics*", Composite Structures 135 (2016) 8–16.

- Wen, H.M., 2000. “*Predicting The Penetration and Perforation of FRP Laminates Struck Normally by Projectiles with Different Nose Shapes*”, Composite Structures 49 (2000) 321-329.
- Wen, H.M., 2001. “*Penetration and Perforation of thick FRP Laminates*”, Composites Science and Technology 61 (2001) 1163–1172.
- Wiśniewski, Adam, Michał, Gmitrzuk, 2012, “*Validation Of Numerical Model Of The Twaron® CT709 Ballistic Fabric*”, Military Institute of Armament Technology, 7 Wyszyńskiego St., 05-220 Zielonka, Polandv corresponding author, e-mail: wisniewskia@witu.mil.pl.
- Wu, Q.G, H.M., Wen, Y., Qin, S.H., Xin, 2011, “*Perforation of FRP laminates under impact by flat-nosed projectiles*”, Composites: Part B 43 (2012) 221–227.
- Zhou, Zhisong, Gaohui, Wu, Longtao,, Jiang, Ruifeng, Li, Zhongguo, Xu, 2014, “*Analysis Of Morphology And Microstructure Of B4C/2024Al Composites After 7.62 Mm Ballistic Impact*”, Materials and Design 63 (2014) 658–663.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Fariz Rifqi Zul Fahmi yang dilahirkan di Mojokerto pada tanggal 07 September 1994. Penulis pernah menjalankan pendidikan formal di SDN Miji 4, SMPN 1 Kota Mojokerto, dan SMAN 1 Sooko Kab Mojokerto.

Setelah lulus dari SMA tahun 2012, Penulis diterima menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS dan terdaftar secara administrasi dengan NRP. 2712 100 031. Semasa perkuliahan, penulis aktif berorganisasi, Penulis juga pernah melaksanakan kerja praktek di PT Pertamina RU IV. Penulis menutup kuliah di kampus dengan Tugas Akhir berjudul **“Pemodelan Pengaruh Kecepatan Peluru Dan Arah Serat Komposit Terhadap Kekuatan Impak Balistik Komposit E-Glass/Isophthalic Polyester”**.

Email : farizrifqi49@gmail.com

Telepon : 087853149186

“Halaman ini sengaja dikosongkan”